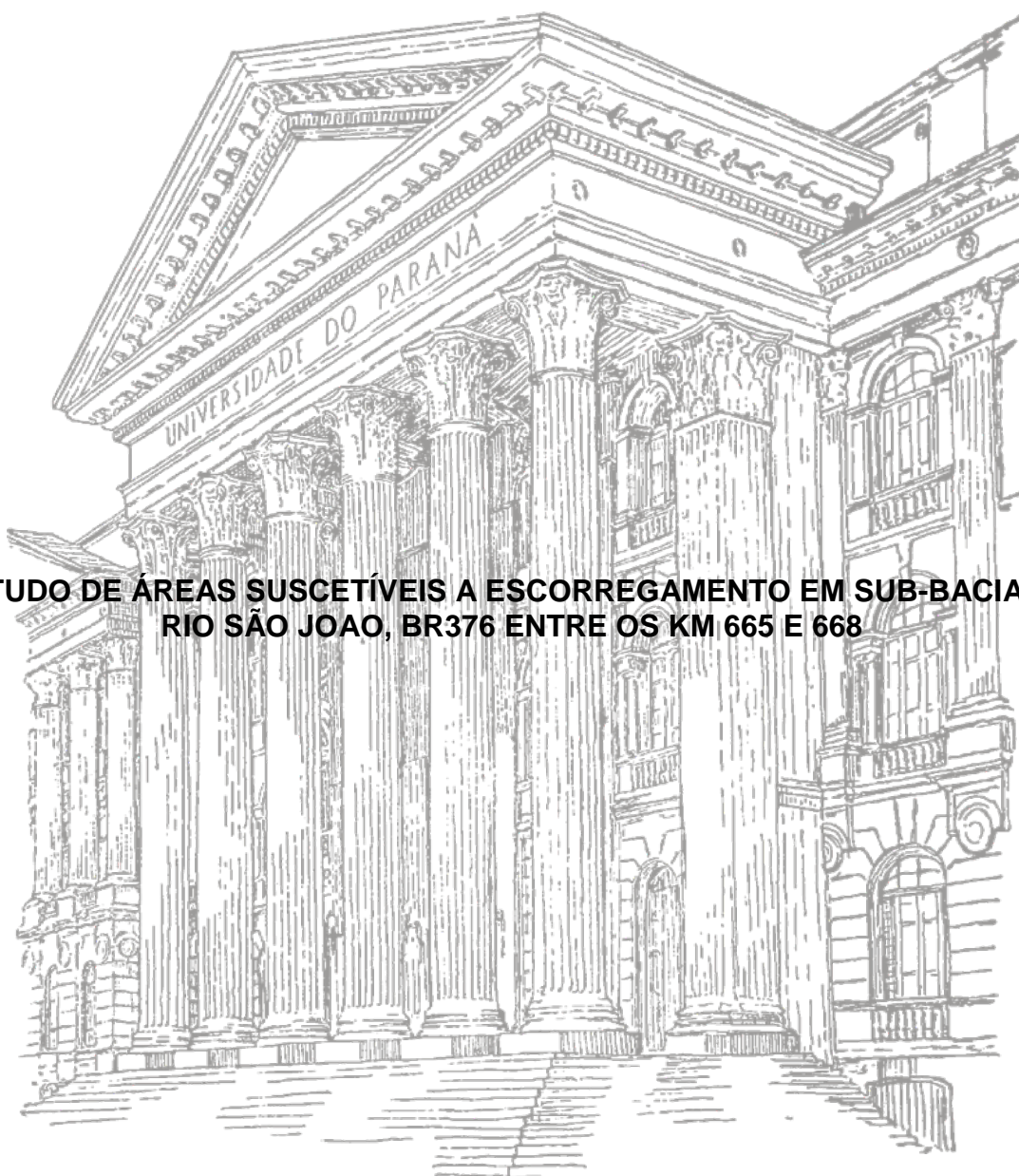


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA PAULA DE MELO E SILVA VAZ

**ESTUDO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A ESCORREGAMENTO EM SUB-BACIA DO
RIO SÃO JOÃO, BR376 ENTRE OS KM 665 E 668**



**CURITIBA
2014**

ANA PAULA DE MELO E SILVA VAZ

**ESTUDO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A ESCORREGAMENTO EM SUB-BACIA DO
RIO SÃO JOÃO, BR376 ENTRE OS KM 665 E 668**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geologia, no Curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Pio Fiori
Co-orientador: Prof. Dr. Claudinei T. da Silveira

**CURITIBA
2014**

Vaz, Ana Paula de Melo e Silva

Estudo de áreas suscetíveis a escorregamentos em sub-bacia do Rio São João, BR 376 entre os km 665 e 668 / Ana Paula de Melo e Silva Vaz. – Curitiba, 2014.

111f. :il., tabs., mapas

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia
Orientador: Alberto Pio Fiori.

Co-orientador: Claudinei Taborda da Silveira

1.Deslizamento. 2. Microbacias hidrográficas. 3. Solos.

I. Alberto Pio Fiori. II. Claudinei Taborda da Silveira. III. Título.

CDD 551.303

TERMO DE APROVAÇÃO

ANA PAULA DE MELO E SILVA VAZ

*“Estudo das áreas suscetíveis a escorregamento
em sub-bacia do rio São João, BR376 entre os Km
665 e 668”*

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná. Comissão formada por:

Prof. Dr. Donizeti Antonio Giusti - UFPR

Prof. Dr. Luiz Eduardo Mantovani - UFPR

Prof. Dr. Alberto Pio Fiori - UFPR
Presidente

Curitiba, 30 de julho de 2014.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais por me concederem o dom da vida, apoio e dedicação.
Ao meu amado marido Edimo e minhas amadas filhas Nathália e Luiza,
pelo amor incondicional, e principalmente por entenderem minhas ausências.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela oportunidade de poder estudar, vivenciar e descobrir tantas coisas novas e boas a cada dia.

A minha mãe por me ensinar a lutar e ter perseverança.

Ao meu pai por sempre me mostrar o lado positivo das mais diversas situações.

Ao amado marido Edimo José Vaz por me apoio, sempre, mesmo em tempos difíceis e por não me deixar desistir.

As minhas queridas e amadas filhas Nathália e Luiza por serem a luz da minha vida.

Aos todos os amigos que fiz durante estes dois anos, em especial:

Sandra Martins Ramos, Yulimar Milán, Andrés Gonzalez, Mylene Nascimento, por serem parceiros de aula e da vida.

Ao pessoal do Nugeo, que sempre estiveram dispostos a tirar todas minhas dúvidas: Priscilas, Gisele, Tammy, Felipe, Jonatas, Giovani, Josemar, Ricardo, Daiane e Clotilde.

Com certeza vocês um lugar especial.

A meu orientador Prof. Dr. Alberto Pio Fiori por ser a simpatia em pessoa e por estar sempre disponível, além das lições de vida que aprendi.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira por dividir o conhecimento de maneira tão simples e suave.

Ao pessoal do LAME, especialmente Reginaldo que me acompanhou e corrigiu alguns detalhes durante os ensaios.

E as coordenadoras do Programa de Pós-Graduação pela ajuda com burocracias e documentos.

Muito obrigada!

EPÍGRAFE

“A alegria que se tem em pensar e aprender faz-nos pensar e aprender ainda mais”.

Aristóteles

RESUMO

Os escorregamentos de massa, decorrentes de processos naturais e intervenções antrópicas, são processos há muito tempo conhecidos e estudados. Quando as modificações decorrentes de deslizamentos atingem áreas ocupadas pelo ser humano, causam prejuízos e perda de vidas. Diante destes cenários faz-se necessário realizar estudos, levantamentos e monitoramentos constantes destas áreas. Estudos de estabilidade de taludes devem levar em consideração a área de microbacias hidrográficas, visto que o fluxo de água, geralmente no exutório, decorre da infiltração e acumulação da água da chuva que é captada como todo ou parcialmente pela bacia, e referida com a área de contribuição. O local estudado faz parte de um projeto, convênio do Departamento de Engenharia Civil da UFPR com a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). O presente estudo realizou modelagens em ambiente SIG através do software ArcGis®. A determinação do fator de segurança e a sua distribuição em mapas de índices de segurança das vertentes foi feito com o emprego de equações descritas em Fiori e Carmaginani (2009), obtendo-se mapas em escala 1:17.000, sendo esta escala a mais adequada para o nível de detalhamento desejado. Área de estudo localiza-se no município de Tijucas do Sul, a aproximadamente 72 km de Curitiba, na BR 376 que liga Curitiba-PR à Garuva-SC, com total de 3,17 km². Inserida Serra do Mar que é caracterizada por seu relevo acidentado, vertentes rochosas e íngremes, onde predominam granitos e migmatitos. A área corresponde a uma sub-bacia inserida na bacia hidrográfica do Rio São João, e seu curso principal cruza a rodovia. Para a realização do estudo estão sendo utilizados dados topográficos, hidrológicos e pluviométricos, além de vistorias de campo. Através de modelagem matemática para vertentes de talude infinito, obteve-se um cenário preliminar do fator de segurança, levando-se em conta coesão do solo, ângulo de atrito interno, altura do nível de água, índice pluviométrico e forma e inclinação da vertente. Diversos pontos foram amostrados por sondagens SPT (dados fornecidos pela concessionária OHL), na área de estudo e proximidades foram selecionados 43 amostras. Os respectivos boletins de sondagem foram utilizados para os cálculos dos valores dos ângulos de atrito e coesão. Visando realizar comparações quanto aos valores encontrados por meio dos cálculos baseados no SPT foram coletadas amostras indeformadas para ensaio de cisalhamento direto, de acordo com a NBR 9604 em três pontos. As coletas das amostras foram realizadas nos locais onde ocorreram deslizamentos anteriores e ensaios de cisalhamento direto realizados entre os meses de janeiro e fevereiro de 2014, sendo obtido valor médio para ângulo de atrito no ensaio de cisalhamento direto foi de 34,02° e coesão média foi de 6,71 kPa. Em comparação os valores obtidos por meio do cálculo baseado no SPT são um pouco menores, sendo que temos como média para ângulo de atrito 31,45° e coesão média 5,01 kPa. Entre os dois métodos foram utilizados para obtenção do mapa de suscetibilidade os valores obtidos por meio do cálculo baseado no SPT por estes terem apresentados valores menores resultando em um mapa de FS de maior confiabilidade. O mapa de suscetibilidade apresentou 50,7% da área de estudo classificada como muito alta suscetibilidade e alta suscetibilidade, principalmente na área ao norte que converge para a rodovia.

Palavras-Chave: Vertentes naturais – Escorregamento – Fator de segurança.

ABSTRACT

Landslides occurs because of natural process or human intervention, are events that are being studding for long time. When the changes made by an landslide hit occupied areas causes dead and financial loss. On this scenario are necessary studies and constant monitoring of these areas. Slope stability researches must take in account the area of watershed, whereas the water flux, usually at the exit of the basin is where rain water infiltrate and is partly or full captured, and is known as contribution area. The study area is part of a project made between the Civil Engineer Department of UFPR and the National Land Transportation Agency (NLTA). The present study made modeling in Geographic Information System, thought the ArcGis® software. Determination of safety factor and its distribution on maps of safety index of the slopes were made using equations described by Fiori e Carmaginani (2009), obtain maps in scale of 1:17.000, the scale used was the one that result the best level of detailing. The study area is located in Tijucas do Sul, approximately 72 km from Curitiba, at the road BR 376 that connects Curitiba-PR to Garuva-SC, with total of 3,17 km². Is inserted at Serra do Mar which is characterized by is hills, rocky and steep slopes where dominates by granite and migmatite. The study area is an micro-basin which is part of São João River basin, its principal chanel cross the two lanes of the road. To develop the research were used database of topography, hydrology and rainfall combined with field inspections. Due the mathematic modeling for infinity slopes were obtained a preliminary scenario of the safety index, taking account the cohesion of the soil, angle of internal friction, height of water level, form and inclination of the slope. In several places were made the Standart Penetration Test (SPT), information given by the OHL dealership, being selected 43 samples. The bulletin poll were used to calculate values of cohesion and angle of internal friction. In order to compare the values calculated by SPT, undeformed samples were collected according NBR 9604 and analyzed by direct shear test made between January and February of 2014, the medium value of angle of internal friction obtained by the shear test is 34,02° and medium cohesion is 6,71 kPa. In compare with the values obtained by the calculation based on SPT are smaller, having as medium of angle of internal friction was 31,45° and medium cohesion of 5,01 kPa. Between the two methods used to obtain the suscepibility map the values obtained based on SPT presented smaller values with result in a map of SI more trustable. The susceptibility map presented 50,7% of the study are were classified with very high susceptibility and high susceptibility specially in the North are that converge to the road.

Key words: Natural slopes – Landslide – Safety Index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Solo coluvial ou talus.	21
Figura 2: Guia para Grupamento de Classes de Textura	24
Figura 3: Contato entre sólidos	32
Figura 4: Diagrama do arranjo para ensaio de cisalhamento direto.	32
Figura 5: Partículas de areia: forma poligonal resulta em maior atrito interno.....	34
Figura 6: Interações da água da chuva-vegetação-solo.	41
Figura 7: Curvatura da vertente em perfil e relação com o fluxo de água, representado pelas setas.	43
Figura 8: Processos geomorfológicos dominantes em uma vertente.	44
Figura 9: Tipos de escorregamento.	46
Figura 10: Localização da área de estudo.	50
Figura 11: Mapa de classificação Köppen.	51
Figura 12: Folha Curitiba e localização da área de estudo.	52
Figura 13: Procedimento de coleta e armazenamento dos blocos de amostra indeformada.	66
Figura 15: Ângulo de atrito médio das unidades amostrais.....	86
Figura 14: Profundidade média.....	86
Figura 16: Valores obtidos para coesão.	87
Figura 17: Correlação entre ângulo de atrito interno e profundidade.....	87
Figura 18: Correlação entre Coesão e profundidade.	88
Figura 19: Modelagem dos corpos de prova.	91
Figura 21: Corpo de prova rompido após o ensaio.....	92
Figura 20: (a) Equipamento de ensaio de cisalhamento direto; (b) Detalhe da caixa de cisalhamento.....	92
Figura 22: Mapa planialtimétrico.	96
Figura 23: Mapa de declividade	97
Figura 24: Mapa hipsométrico.	98
Figura 25: Mapa de solos e pontos de coleta de amostras indeformadas e pontos de SPT.	99
Figura 26: Mapa de susceptibilidade da sub-bacia estudada.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Grupamento textural.	24
Tabela 2: Terminologia do Sistema Unificado	25
Tabela 3: Esquema para classificação pelo TRB.	26
Tabela 4: Valores típicos para coesão	30
Tabela 5: Valores típicos do ângulo de atrito para areias e siltes.....	34
Tabela 6: Valores típicos para ângulo de atrito	35
Tabela 7: Tabela dos estados de compactidade e de consistência.	61
Tabela 8: Influência das propriedades de solos granulares na resistência à penetração.	62
Tabela 9: Exemplo de organização para cálculo de ângulo de atrito e coesão.....	64
Tabela 10: Dependências do Fator de Segurança.....	68
Tabela 11: Caracterização das unidades amostrais.....	72
Tabela 12: Caracterização da unidade amostral km 667+120A	73
Tabela 13: Caracterização da unidade amostral km 667+120B	75
Tabela 14: Caracterização da unidade amostral km 667+160.....	76
Tabela 15: Caracterização da unidade amostral km 667+230.....	77
Tabela 16: Caracterização da unidade amostral km 667+300.....	81
Tabela 17: Caracterização da unidade amostral km 667+710.....	82
Tabela 18: Caracterização da unidade amostral km 667+900.....	84
Tabela 19: Caracterização granulométrica, amostras deformadas.....	89
Tabela 20: Localização e caracterização dos pontos de coleta de amostra indeformada.	89
Tabela 21: Amostras, tipo de ensaio, tensões e carregamento.....	91
Tabela 22: Resultados para Ângulo de atrito e coesão – ensaio de cisalhamento direto.	93
Tabela 23: Comparação de valores: calculados por SPT; ensaio de cisalhamento direto; BORCHARDT (2005) e KOZCIAK (2005).	94
Tabela 24: Valores utilizados para obtenção do Mapa do Fator de Segurança.....	100
Tabela 25: Área e percentual de classes de susceptibilidade a escorregamento.....	103

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1)	63
Equação (2)	63
Equação (3)	63
Equação (4)	64
Equação (5)	64
Equação (6)	64
Equação (7)	64
Equação (8)	64
Equação (9)	68
Equação (10)	68

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI – Amostra Indeformada
ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná
kPa – kilopascal
LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas
MDT – Modelo Digital do Terreno
MINEROPAR – Serviço Geológico do Paraná
NBR – Norma Brasileira
SBCS – Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SEMA – Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SIG – Sistema de Informações Geográficas
SPT – Standart Penetration Test
SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB – Transportation Research Board
USGS – U.S. Geological Survey

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
1.2 Justificativa.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1 SOLO	19
2.2 TIPOS DE SOLO.....	20
2.2.1 Solos coluviais.....	21
2.2.2 Solos residuais	22
2.2.3 Classificação dos solos	22
2.2.3.1 Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.....	23
2.2.3.2 Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).....	24
2.2.3.3 Sistema de Classificação Rodoviário - Transportation Research Board (TRB)	25
2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS	26
2.4 COESÃO DOS SOLOS	29
2.5 CISALHAMENTO DIRETO.....	31
2.6 ÂNGULO DE ATRITO INTERNO	33
2.7 ÁGUA NO SOLO	35
2.8 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	37
2.9 COBERTURA VEGETAL	39
2.10 VERTENTES E TALUDES	42
2.11 TIPOS DE VERTENTE.....	42
2.12 ESTABILIDADE DE VERTENTES	44
2.12.1 Tipos de escorregamentos	46
2.13 MÉTODOS UTILIZADOS PARA A ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES.....	48
3 MATERIAL E MÉTODOS	50
3.1 Caracterização da área de estudo	50
3.2 Procedimentos metodológicos	58
3.2.1 Amostragem	60
3.2.1.1 Resistência à penetração – Standart Penetration Test (SPT).....	60
3.2.1.2 Amostra indeformada para ensaio de cisalhamento direto.....	65

3.2.2 Fator de Segurança.....	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1 Visitas ao sítio de estudo.....	70
4.1.1 Caracterização do solo e locação das amostras indeformadas	70
4.1.2 Sondagens SPT	72
4.1.2.1 Unidade amostral KM 667+120 A e B	73
4.1.2.2 Unidade amostral KM 667+160	76
4.1.2.3 Unidade amostral KM 667+230	77
4.1.2.4 Unidade amostral KM 667+300	80
4.1.2.5 Unidade amostral KM 667+710	82
4.1.2.6 Unidade amostral KM 667+900	83
4.1.3 Caracterização geral das unidades amostrais de SPT.....	85
4.1.4 Análise granulométrica das amostras deformadas.....	88
4.1.5 Amostras indeformadas.....	89
4.1.6 Mapas obtidos por modelagem	96
4.1.6.1 Mapa de Fator de Segurança.....	100
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
Referências bibliográficas.....	106

1 INTRODUÇÃO

A intensificação das chuvas em algumas épocas do ano tem causado danos e prejuízos através de inundações e escorregamentos. Em alguns locais como alguns municípios dos estados do Rio de Janeiro e Santa Catarina enfrentaram verdadeiros desastres naturais, como os que ocorreram no Morro do Boi (SC) em abril de 2010 e na região de Nova Friburgo (RJ) em janeiro de 2011 e também no Paraná, na região de Morretes-Paranaguá em março de 2011.

De acordo com KELLER (1992) as vertentes são os acidentes geográficos mais comuns e que embora pareçam estáveis e estáticas, na verdade são sistemas dinâmicos em evolução. Por se constituírem de um processo dinâmico os deslizamentos de massa e fenômenos relacionados, ocorrem com ou sem a presença de atividades humanas. Porém, os estudos destes processos têm contribuído para uma redução dos deslizamentos através do planejamento de uso e ocupação do solo e por meio da implantação de estruturas e técnicas que buscam conter ou minimizar os movimentos de massa.

No Brasil é ainda muito incipiente a utilização de estudos para prevenção de processos relacionados aos movimentos de massa. O estudo e análise das condições e das condicionantes que deflagram os deslizamentos é uma ferramenta que pode ser utilizada pelo poder público para prevenção de acidentes e prejuízos, uma vez que a prevenção é economicamente mais viável que a remediação.

A Serra do Mar é naturalmente uma região onde a ocorrência de deslizamentos é uma constante, considerando-se o relevo e a quantidade de chuvas. Vários estudos foram realizados, tanto no estado do Paraná quanto em São Paulo, destaca-se no presente as pesquisas realizadas no Estado do Paraná por SILVEIRA *et. al.*, (2012b), BORCHARDT (2005), KOZCIAK (2005), LOPES (2013), na Serra do Mar.

LOPES (2013) destaca que o estudo para compreensão e previsão de movimentos de massa são realizados há bastante tempo, porém somente após a década de 1980 o acesso a computadores possibilitou um desenvolvimento mais rápido dos modelos matemáticos para a realização destes estudos.

Modelos probabilísticos e determinísticos buscam equacionar as variáveis envolvidas nos escorregamentos sendo o resultado uma previsão de possíveis áreas mais e/ou menos susceptíveis que são apresentadas em mapas gerados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Um dos problemas que podemos relacionar ao estudo de estabilidade de vertentes é a obtenção de dados significativos, para que os resultados sejam os mais próximos possível da realidade. A utilização de métodos indiretos diminuem custos e facilita tais procedimentos, uma vez que conhecendo-se como se dá o movimento de massa pode-se fazer uma análise das variáveis de maior influência.

AHRENDT (2005, p. 24) destaca que para “trabalhos que envolvam a previsão da ocorrência de movimentos de massa gravitacionais de qualquer natureza, em vertentes naturais, é importante que se tenha em mente que os mesmos ocorrem a partir de uma sequência de eventos e/ou estágios, cuja caracterização é muito importante”.

1.1 Objetivos

Como objetivo geral da pesquisa, realizou-se análise quantitativa, da qual obteve-se valores demonstrados em forma de mapa em escala 1:17.000 do Fator de Segurança de vertentes naturais da sub-bacia do Rio São João, as margens da rodovia BR 376. A escala utilizada foi a que melhor adequou-se a área de estudo escalas maiores reduziriam o nível de detalhamento e menores fariam cortes na área.

A presente pesquisa tem como objetivos específicos:

- a) Obtenção de mapas planialtimétrico, de declividade, hipsométrico, e de solos, em escala 1:17.000, sendo que esta escala foi a mais adequada para o detalhamento da área;
- b) Compilação dos dados das sondagens SPT para determinação dos parâmetros físicos do solo como valores de ângulo de atrito e coesão dos solos;

- c) Comparação dos resultados dos parâmetros físicos do solos como ângulo de atrito e coesão por meio de ensaio de cisalhamento direto e SPT;
- d) Elaboração do mapa de índices de segurança da sub-bacia hidrográfica em estudo.

1.2 Justificativa

Análises e estudos de estabilidades de taludes auxiliam na previsão dos locais que apresentam maiores suscetibilidades, com base nestes estudos é possível realizar algumas medidas de prevenção, como a instalação equipamentos que reduzem a susceptibilidade das áreas de vertente.

Como a rodovia BR 376 encontra-se, em sua maior porção, na Serra do Mar a avaliação das condições atuais e futuras tem por meta a recomendação do emprego de métodos preventivos para evitar perdas e prejuízos no transporte ao longo da mesma.

O presente estudo faz parte de um projeto em desenvolvimento entre o Departamento de Engenharia Civil da UFPR e a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) ao longo da BR 376.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

FIORI e CARMIGNANI (2009) ressaltam que a mensuração das propriedades físicas do solo podem ser realizadas em laboratório com relativa facilidade, e sendo os solos semelhantes, os resultados obtidos, mesmo que haja uma certa variação nos valores, não modificam de maneira substancial a avaliação. Porém variáveis externas, como ocupação antrópica e quantidade de chuvas, por exemplo, efetivamente causam variações importantes no condicionamento da estabilidade de vertentes e taludes.

O estudo de movimentos de massa considera, conforme o enfoque e a disponibilidade de dados, as variáveis climáticas, geológicas, antrópicas (estas relacionadas ao uso e cobertura do solo), geotécnicas, pedológicas e geomorfológicas (SESTINI, 1999).

No que diz respeito à quantidade de água da chuva de interesse do estudo, é útil considerar áreas de contribuição que representa a área de captação da água da chuva de uma bacia ou micro-bacia hidrográfica, e demonstra uma relação direta entre a forma de vertente e os processos hidrológicos e erosivos. Desta forma, possui um papel relevante na análise da suscetibilidade, especialmente por prever os limites das zonas saturadas das vertentes em função das precipitações e da transmissividade do solo. Quando utilizada juntamente com outras variáveis como declividade e propriedade dos solos, tem mostrado ser de grande utilidade na previsão de áreas instáveis (VIEIRA, 2007).

De acordo com os estudos de KOZCIAK (2005) há diversas maneiras de se realizar o cálculo para análise de estabilidade de taludes, desde formulas mais simples que correlacionam o ângulo de atrito e a inclinação da vertente e cálculos mais complexos que consideram vários fatores envolvidos como vegetação, propriedades físicas e mecânicas dos solos, presença ou não de água, planos de ruptura preexistentes, forma da superfície entre muitos outros.

A previsão de áreas suscetíveis a movimentos de massa na paisagem, segundo VIEIRA (2007) também pode ser realizada por meio de métodos indiretos que contemplam tanto a aplicação de ferramentas estatísticas quanto o desenvolvimento e uso de modelos matemáticos.

A determinação das principais causas que levam à ocorrência dos escorregamentos translacionais rasos nas vertentes deve considerar na concepção de FERREIRA (2013), a interação do papel exercido pela vegetação, pelos fatores topográficos, pelas propriedades dos solos e das rochas, incluindo as características hidrológicas, mecânicas, químicas e mineralógicas e pela dinâmica da água dentro dos materiais. Tendo em vista que as condicionantes que desencadeiam estes processos são variáveis, podendo ser acionados por dinâmicas naturais ou antrópicas, até mesmo uma combinação de ambas.

2.1 SOLO

KELLER (1992) discorre sobre os ciclos geológicos e seus subciclos que através de 4,5 bilhões de anos da história da Terra, criaram, mantiveram ou transformaram os materiais na superfície da Terra, tais transformações se deram por numerosos processos físicos, químicos e bioquímicos. O autor ressalta como mais importantes os ciclos tectônico e hidrológico.

Como resultado dos processos, temos o intemperismo, que é a deterioração das rochas e sua transformação em solo. ORTIGÃO (2007) classifica o intemperismo em dois grandes grupos, o intemperismo químico e o mecânico, sendo o primeiro relacionado aos processos químicos que alteram, solubilizam e depositam os minerais de rocha, sendo este o mais frequente em climas quentes e úmidos, logo muito comum no Brasil. Já o segundo provem da ação desagregadora de transporte da água, do vento e da variação de temperatura. É bastante frequente a ação conjunta de vários agentes do intemperismo.

CAPUTO (1988) relaciona a formação das partículas mais grossas, areias e pedregulhos ao intemperismo mecânico. Já as partículas mais finas do solo como a argila são formadas em condições especiais por decomposição química que modifica química e mineralogicamente as rochas originárias.

Segundo KELLER (1992) os materiais resistentes mais insolúveis permanecem no local de origem para depois sofrer ataque biológico na formação de

solos residuais. Se o material resistente for transportado por água, ventos ou gelo serão depositados e posteriormente sofrerão ataques biológicos.

Ainda de acordo com KELLER (1992) em uma amostra de solo é possível observar a presença de material sólido, matéria orgânica e poros preenchidos por gases (maior parte com ar), água e outros líquidos.

A estrutura dos solos, de acordo com PINTO (1998) se dá através da disposição das partículas e combinação das forças de atração e de repulsão elas.

DE MARIA (2008) descreve o solo como um recurso não renovável que fornece suporte para a cobertura vegetal (natural e cultivada) além de ter papel muito importante no ciclo hidrológico funcionando com um filtro que direciona a água das chuvas aos aquíferos e lençóis freáticos.

2.2 TIPOS DE SOLO

Definir o solo dependerá do objetivo pretendido. Para os engenheiros é um material que pode ser facilmente removido, escavado ou modelado para receber uma estrutura que será construída. Já os agrônomos definem o solo como sendo o local de cultivo que fornece nutrientes e água para as plantas. Por sua vez para o geólogo de mineração, a capa de solo sobrejacente ao minério é simplesmente um material de rejeito a ser escavado.

CRUZ (2006) define as transformações superficiais como um termo geral para definir todo material superficial sobreposto à rocha sã, o que compreende o manto de intemperismo, e que constituem o material encontrado cobrindo parcialmente ou completamente o substrato rochoso, sendo este pouco consolidado e com espessuras que variam de poucos decímetros a dezenas de metros de espessura.

Para KELLER (1992) a textura do solo pode ser identificada em campo por estimativa. Mas sua caracterização textural é dada através de ensaios laboratoriais pela determinação das porcentagens de areia, silte e argila na porção de solo que possua diâmetros menores que 2 mm. A textura do solo é importante, pois pode ser utilizada para identificar o processo de formação do mesmo, bem

como para interpretar a história geológica de um determinado local, além de fornecer informações importantes relacionadas ao comportamento do mesmo.

O esforço causado pelo uso e ocupação do solo, de acordo com ORTIGÃO (2007) tende a comprimi-lo, provocando deformações por compressão e pode cisalhá-lo e levá-lo a ruptura. Por este motivo é importante conhecer o solo e seu comportamento.

2.2.1 Solos coluviais

MITCHEL & SOGA, (2005) definem o colúvio como solo formado em um ponto da vertente e posteriormente transportado morro abaixo pela gravidade. Solos coluvionais frequentemente consistem na abundância de fragmentos da rocha matriz e uma mistura heterogênea de argila a areia. São usualmente encontrados nas vertentes de vertentes e podem se acumular em depressões topográficas ou vales.

Para CAPUTO (1988) os solos coluvionares são classificados assim por terem sido transportados pela ação da gravidade.

Um tipo de solo denominado coluvional ou talus é muito comum ao pé de vertentes naturais de granito e gnaiss, caso típico dos morros do Rio de Janeiro e de toda a serra do Mar (ORTIGÃO, 2007), como mostra a Figura 1.

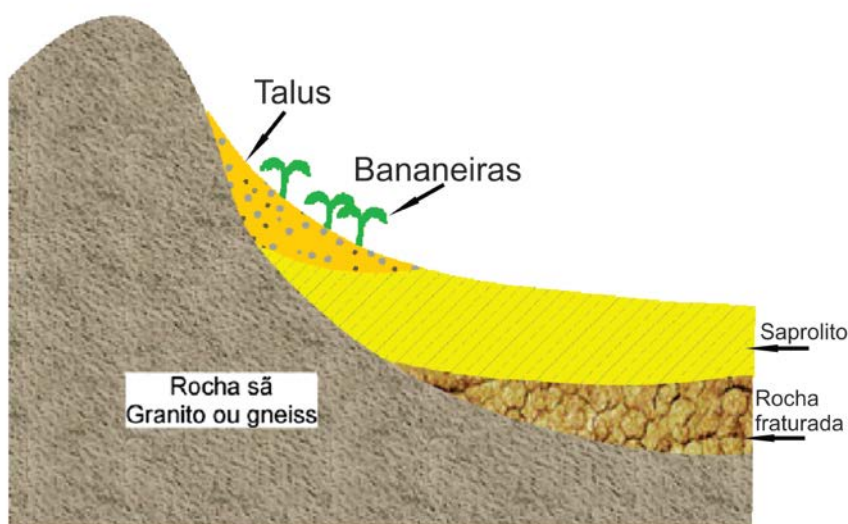


Figura 1: Solo coluvial ou talus.
Fonte: ORTIGÃO, 2007.

ORTIGÃO (2007) discorre que muitas vezes a presença de talus pode ser identificada pelo tipo de vegetação. Percebe-se que as bananeiras são muito comuns nestes terrenos, devido à baixa compactação (muito fofos) e à elevada umidade, além da presença de blocos soltos e por estar depositados ao pé das vertentes. O autor alerta que estes depósitos são os locais onde ocorre grande parte dos acidentes durante chuvas intensas que saturam o solo, elevam o nível das águas e leva ao deslizamento.

2.2.2 Solos residuais

Os solos residuais são os solos que permanecem no mesmo local da rocha de origem. CAPUTO (1988) descreve que é possível observar uma transição gradual do solo até a rocha mãe. Pode ser chamado também de solo autóctone.

PINTO (2000) descreve que para que haja sua ocorrência é necessário que a velocidade de decomposição da rocha seja maior do que a velocidade de remoção. E ainda que como a velocidade de intemperização dependerá de alguns fatores como chuvas, temperatura e vegetação, estes solos são mais abundantes em locais de clima tropical como é o caso do Brasil.

2.2.3 Classificação dos solos

Devido as diferentes visões e usos dos solos foram criadas diversas classificações, algumas são similares e outras bastante distintas entre si.

O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista de engenharia, é o poder de estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema (PINTO, 2000).

Devido ao fato de haver ao menos três classificações de solos, uma definida pela Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA) como Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, bastante utilizada nas ciências dos solos, a segunda definida como Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e a última a classificação definida pela Transportation Research Board (TRB), que é utilizada por órgãos como o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) e pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER).

Para entender quais as características semelhantes e distintas, as classificações são apresentadas a seguir.

2.2.3.1 Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) publicou em 2006 a segunda edição do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SBCS). Diferentemente dos outros dois sistemas de classificação que serão apresentados a seguir, este sistema de classificação é taxonômico e divide os diferentes tipos de solo em Ordem, subordem, grandes grupos, subgrupos, famílias e séries, além disso, as divisões possuem classes que estão divididas em níveis que podem chegar até o 6º nível categórico.

A classificação de um solo é obtida a partir da avaliação dos dados morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do perfil que o representa. Aspectos ambientais do local do perfil, tais como clima, vegetação, relevo, material originário, condições hídricas, características externas ao solo e relações solo-paisagem, são também utilizadas (EMBRAPA, 2006).

Algumas destas características não influenciam diretamente na estabilidade de taludes, sendo a característica mais importante a granulometria, a SBCS também agrupa os solos em grupamentos texturais de acordo com a granulometria, a Tabela 1 mostra as divisões por textura.

Tabela 1: Grupamento textural.

Textura	Característica
Arenosa	Compreende as classes texturais areia e areia franca
Média	Compreende classes texturais ou parte delas, tenda na composição granulométrica menos de 35% de argila e mais de 15% de areia, excluídas as classes texturais de areia e areia franca
Argilosa	Compreende classes texturais ou parte delas, tenda na composição granulométrica de 35 a 60% de argila
Muito argilosa	Compreende classe textural com mais de 60% de argila
Siltosa	Compreende parte de classes texturais que tenham menos de 35% de argila e menos de 15% de areia

Fonte: Adaptado de EMBRAPA, 2006.

A Figura 2 é um guia para o Grupamento de Classes de Textura.

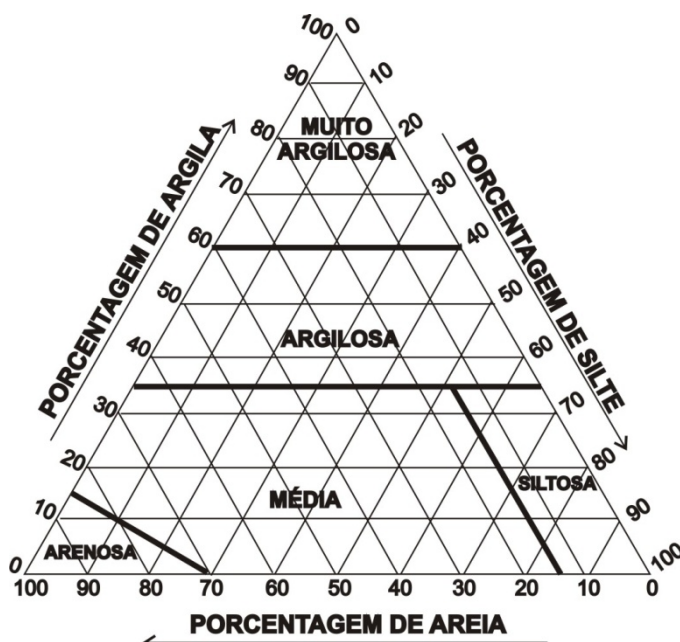


Figura 2: Guia para Grupamento de Classes de Textura

Fonte: Embrapa, 2006.

2.2.3.2 Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS)

PINTO (2000) descreve que a classificação unificada (SUCS) foi elaborada primeiramente pelo Prof. Casagrande especificamente para obras de aeroportos e que sua utilização, após algumas alterações acabou sendo

generalizada. O sistema apresenta a identificação dos solos pelo conjunto de suas letras. Como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Terminologia do Sistema Unificado

Tipo principal	G	Pedregulho
	S	Areia
	M	Silte
	C	Argila
	O	Solo orgânico
Dados complementares	W	Bem graduado
	P	Mal graduado
	H	Alta compressibilidade
	L	Baixa compressibilidade
	Pt	Turfas

Fonte: Adaptado de PINTO, 2000.

Do ponto de vista da engenharia, a expressão “bem graduado” para o solo, segundo PINTO (2000), expressa o fato de que a existência de grãos com diversos diâmetros confere ao solo, em geral, melhor comportamento, uma vez que as partículas menores ocupam os vazios entre as maiores, resultando em menor compressibilidade e maior resistência.

2.2.3.3 Sistema de Classificação Rodoviário - Transportation Research Board (TRB)

Este sistema, muito empregado na engenharia rodoviária em todo o mundo, foi originalmente proposto nos Estados Unidos. Assim como o SUCS, também baseado na granulometria e nos limites de Atterberg, o modelo de classificação está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Esquema para classificação pelo TRB.

% P #200 < 35	% P #10 2,0 mm	% P #40 0,42 mm	% P #200 0,075 mm	IP
A-1a	< 50	< 30	< 15	< 6
A-1b		< 50	< 25	< 6
A-3		> 50	< 10	NP
A-2	A-2-4 A-2-5	IP A 2-6 A 2-7 10 A 2-4 A 2-5 LL 40		
	A-2-6 A-2-7			
% P #200 > 35	A-4 A-5 A-6 A-7-5 A-7-6	IP A 7-6 A 6 A 7-5 10 A 4 A 5 LL 40		

Fonte: PINTO, 2000.

Em seus estudos PINTO (2000) descreve que as classificações SUCS e TRB como semelhantes, já que ambas consideram a predominância dos grãos graúdos ou miúdos, dão ênfase à curva granulométrica só no caso de solos graúdos com poucos finos e classificam os solos graúdos com razoável quantidade de finos, e os próprios solos finos com base exclusivamente nos índices de Atterberg.

Ainda de acordo com o autor, as discrepâncias entre as classificações clássicas e comportamento observado de alguns solos nacionais se deve, certamente, ao fato destes serem frequentemente solos residuais ou solos lateríticos, para os quais os índices de consistência não podem ser interpretados da mesma maneira como são para os solos transportados, de ocorrência nos países de clima temperado, onde os sistemas vistos TRB e SUCS foram elaborados.

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS

O comportamento físico do solo dependerá de como cada uma das três fases (sólidos, água e ar) resistem às forças solicitantes.

A água presente no solo causa a dissolução dos elementos solúveis constituintes dos próprios minerais, pela dissolução dos elementos que tem função

de cimentação, forma-se, de acordo com GUIDICINI & NIEBELE, (1983) uma rede de microfraturas no meio rochoso, o que causa a diminuição dos parâmetros de resistência como coesão e ângulo de atrito. Além disso, segundo o mesmo autor, o processo de alteração das rochas tende a formar zonas de materiais com características de permeabilidade diferentes entre si normalmente dispostas em paralelo à superfície do talude. A presença de camadas menos permeáveis sobre camadas de maior permeabilidade pode resultar no aparecimento de artesianismo e no desenvolvimento de vertentes.

Para MITCHELL & SOGA (2005) a resistência a deformação é dada por forças físico-químicas de interação entre os átomos, moléculas e partículas. A compressibilidade, deformação e a força da massa de solos dependem do esforço necessário para desestabilizar estas forças.

O princípio da pressão efetiva, de Terzaghi, foi uma das maiores contribuições à engenharia e é considerado o marco fundamental do estabelecimento da Mecânica dos Solos com bases científicas independentes (ORTIGÃO, 2007).

As pressões são divididas em total, efetiva e neutra. De acordo com PINTO (1983), a pressão total (σ) é a força total transmitida em uma secção de um determinado plano, dividida pela área desta secção. A pressão neutra (μ) é a pressão da água em um ponto determinado no plano. Já a pressão efetiva, representada por σ' ou $\bar{\sigma}$, é a parcela da pressão total resistida pela estrutura das partículas do solo. Sendo que em um solo saturado a pressão efetiva é igual a diferença entre a pressão total e a pressão neutra, o que de acordo com o autor este foi um dos princípios da mecânica dos solos introduzidos por Terzaghi.

ORTIGÃO (2007) descreve que Terzaghi definiu o princípio da pressão efetiva a partir de observações e da intuição de que o comportamento dos solos saturados quanto a compressibilidade e à resistência ao cisalhamento dos solos saturados depende fundamentalmente da pressão média intergranular, a qual a chamou de pressão efetiva.

Com relação à deformação volumétrica, de acordo com ORTIGÃO (2007) é proporcional a uma variação do índice de vazios (Δe), logo quanto maior o índice de vazios maior será a deformação volumétrica quando o material for comprimido.

O índice de vazios é uma das características mais importantes para a definição de um solo, e é definido pela relação do volume de vazios pelo volume de

sólidos. Este índice físico influencia, por exemplo, na permeabilidade, compressibilidade e resistência a ruptura.

Como a água influencia de maneira direta nas pressões da massa do solo, ORTIGÃO (2007) descreve que isto altera o peso específico aparente úmido que permite calcular as pressões na massa do solo. As argilas apresentam valores da ordem de 13 a 17 kN/m³, enquanto para as areias os valores estão entre 17 e 20 kN/m³. O autor destaca ainda que o peso específico aparente submerso permite descontar o empuxo hidrostático específico (γ_w). Logo, o valor do peso específico submerso (γ_{sub}) resultante é empregado para o cálculo de pressões interangulares ou efetivas.

O comportamento das areias foi evidenciado no estudo de PINTO (1983), que enfatiza o fato do índice de vazios crítico de uma areia ser uma função da pressão confinante. Portanto, quanto maior a pressão confinante sobre uma areia, tanto menor será o índice de vazios. As indicações de compactidade das areias, a rigor, não são características que dependem exclusivamente do estado da areia. Em outras palavras, uma areia com um determinado índice de vazios pode se comportar como compacta, se solicitada com pequenas pressões confinantes, e como fofa, se submetida a pressões confinantes elevadas.

MITCHELL & SOGA (2005) afirmam que a coesão aparente pode ser gerada pela capilaridade, uma vez que a atração exercida pela água na superfície das partículas combina-se com a superfície de tensão, que causa a atração aparente entre as partículas no solo parcialmente saturado. O que na verdade, de acordo com os mesmos autores não é a coesão real, mas sim a força de atrito causada pela tensão positiva efetiva criada pela pressão poro negativa.

PINTO (2000) corrobora com a ideia de que as pressões no solo, no sentido que no interior dos vazios, abaixo do nível da água, a pressão será independente da porosidade do solo, e dependerá somente da profundidade com relação ao nível freático.

2.4 COESÃO DOS SOLOS

A coesão do solo foi definida por GEOTECHDATA.INFO (2013b) como sendo um termo usado para descrever os solos mais resistentes ao cisalhamento. A sua definição é derivada principalmente de o critério de Mohr Coulomb e é usado para descrever a parte não-friccional da resistência de cisalhamento, que é independente da tensão normal.

BORCHARDT, (2005) relaciona a coesão com a força exercida entre as partículas que resulta das atrações intermoleculares, ou seja, a forças de Van Der Waals que agem nos pontos mais próximos do contato, e das repulsões eletrostáticas dos íons dispersos na dupla cama que envolve as partículas coloidais. Neste caso a água adsorvida, mesmo com elevada viscosidade não aumenta a coesão, ao contrário tende a reduzi-la.

Da combinação das forças de atração e repulsão entre as partículas resulta a estrutura dos solos, que se refere à disposição das partículas na massa de solo e às forças entre elas (PINTO, 2000).

Para CAPUTO (1988) a coesão é uma característica típica de solos muito finos, ou seja, com grandes percentuais de argila e silte, sendo que o silte muitas vezes ajuda no rompimento da coesão. Nestes solos é possível distinguir a coesão aparente, já que esta é resultantes da pressão capilar da água contida no solo que age como pressão externa de sucção, por sua vez a coesão verdadeira é devida às forças eletroquímicas de atração de partículas de argila.

A coesão e a adesão, segundo FIORI e CARMIGNANI (2009) são as duas forças atrativas que submetem as moléculas da camada superficial quando há um contato de um sólido e um líquido, sendo a coesão orientada para o interior da massa e a adesão é exercida pelas moléculas do sólido.

Os fatores físico-químicos da resistência ao cisalhamento são os que se manifestam na coesão, cuja maior importância se dá em argilas, pois é nas frações coloidais que as forças interangulares são significativas em relação às massas das partículas (BORCHARDT, 2005).

Os valores típicos para coesão de acordo com o tipo de solo, compilado por GEOTECHDATA.INFO (2013b) e é mostrado na Tabela 4, a seguir.

Tabela 4: Valores típicos para coesão

Classificação USCS	Descrição	Valor médio (KPa)	Valor de literatura (KPa)
GW	Cascalho bem selecionado, cascalho arenoso com pouco ou nenhum fino	0 ± 0	0 [1]
GP	Pouco selecionado, cascalho arenoso, com pouco ou nenhum fino	0 ± 0	0 [1]
GM	Cascalho siltoso, cascalho silto-arenoso	0 ± 0	0 [1]
GC	Cascalhos argiloso, cascalhos silto-argilosos	0 ± 0	0 [1]
SW	Areais bem selecionadas, cascalho arenoso, com pouco ou nenhum fino	0 ± 0	0 [1]
SP	Pouco selecionados, cascalho arenoso, com pouco ou nenhum fino	0 ± 0	0 [1]; 0 [2]
SM	Areno-argiloso	0 ± 0	0 [1]
SC	Areno-siltoso	0 ± 0	0 [1]
ML	Argila inorgânica, areias finas argilosas ou siltosas, com leve plasticidade	0 ± 0	0 [1]
CL	Argila inorgânica, argilo-siltoso com baixa plasticidade	20 ± 10	20 ± 10 [1]
OL	Silte orgânico e argila-siltosa orgânica com baixa plasticidade	10 ± 5	10 ± 5 [1]
MH	Silte inorgânico com alta plasticidade	5 ± 5	5 ± 5 [1]
CH	Argila inorgânica com alta plasticidade	25 ± 10	25 ± 10 [1]
OH	Argila orgânica com alta plasticidade	10 ± 5	10 ± 5 [1]
Pt	Turfa ou outro solo altamente orgânico	5 ± 5	0 – 10 [1]

[1] Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers. [2] Minnesota Department of Transportation, Pavement Design, 2007. [3] NAVFAC Design Manual 7.2 – Foundations and Earth Structures, SN 0525-LP-300-7071, REVALIDATED BY CHANGE 1 SEPTEMBER 1986.

Fonte: Adaptado de GEOTECHDATA.INFO, 2011.

Para MITCHELL e SOGA (2005) a coesão verdadeira é a força de cisalhamento que em excesso gerado pela resistência de atrito ao deslizamento entre as partículas e o rearranjo das partículas. Ou seja, coesão verdadeira deve resultar de aderência entre as partículas, na ausência de qualquer força externamente aplicada ou forças de próprio peso.

A resistência ao cisalhamento dos solos é essencialmente devida ao atrito. Entretanto, a atração química entre partículas, principalmente no caso de estruturas floculadas, e a cimentação de partículas, podem provocar a existência de uma coesão real. A coesão real se caracteriza por ser uma parcela da resistência ao cisalhamento independente da pressão normal atuante no plano (PINTO, 1983).

Ainda de acordo com o mesmo autor, é importante a distinção entre coesão real e coesão aparente, sendo a coesão aparente uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos úmidos, não saturados devido a tensão capilar da água que atrai as partículas. Esta parcela de resistência é um fenômeno de atrito que caracteristicamente tem a tensão normal como consequência da tensão capilar

relacionada ao percentual de umidade, se o solo for saturado ou totalmente seco esta parcela desaparece, por isso é chamado de coesão aparente.

No mesmo sentido, GUIDICINI e NIEBLE (1983) ressaltam que caso haja saturação por meio de percolação em grande quantidade, no caso de chuvas pesadas, o ar será quase completamente expulso e a coesão aparente eliminada isto pode levar ao colapso do talude.

2.5 CISALHAMENTO DIRETO

A resistência ao cisalhamento de uma massa de solo é a resistência interna por área unitária que essa massa pode oferecer para resistir a rupturas e a deslizamentos ao longo de qualquer plano em seu interior (DAS, 2013)

As tensões de cisalhamento em qualquer plano são independentes da tensão neutra, pois a água não transmite esforços de cisalhamento. As tensões de cisalhamento são devidas somente à diferença entre as tensões normais principais e esta diferença é a mesma, tanto quanto se consideram as tensões efetivas como as tensões totais (PINTO, 1983).

A deformação pelo mecanismo de cisalhamento puro envolve a aplicação de um esforço colinear em um corpo. Este, ao se deformar, induz modificações tanto no comprimento como no ângulo entre linhas dantes existentes no corpo indeformado. Linhas originalmente paralelas aos eixos X, Y e Z sofrem mudanças de comprimento com a deformação, mas não sofrem também rotação, denominada rotação interna (FIORI, 1997).

Segundo PINTO (1983) a resistência ao cisalhamento de um solo é a máxima pressão de cisalhamento que este solo pode suportar sem que haja ruptura. Se vistas em escala microscópica, todas as superfícies de contato são rugosas e se tocam somente em alguns poucos pontos. Sendo que as áreas de contato e as pressões normais de contato são mais elevadas e atingem valores iguais aos das tensões de escoamento plástico do material (FIGURA 3).



Figura 3: Contato entre sólidos

Fonte: PINTO, 1983.

A tensão de cisalhamento da ruptura é geralmente considerada como a maior tensão de cisalhamento resistida pelo corpo de prova, embora, em casos especiais, ela possa ser considerada como a tensão – para uma certa deformação ou a tensão residual após longo deslocamento (PINTO, 1983).

Como a umidade tende a reduzir a coesão GUIDICINI e NIEBLE (1983) ressaltam que uma série de dados levantados sobre ensaios de cisalhamento mostraram que um mesmo material ensaiado em condição seca e saturada, apresentam valores inferiores para o caso do material saturado. Neste sentido os autores indicam que os ensaios devem ser realizados em amostras que tenham sido mantidas em condições saturadas, sendo que a saturação destas amostras deve ocorrer de forma lenta para que ocorra dissipação das pressões neutras da superfície de deslizamento.

As propriedades mais significativas dos materiais, na discussão de problemas de estabilidade, são o ângulo de atrito e a coesão de solos e rochas (GUIDICINI & NIBLE, 1983).

Existem vários métodos laboratoriais para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, sendo que, conforme afirma DAS (2013), o ensaio de cisalhamento direto é a mais antiga e a mais simples forma de arranjo para o ensaio de cisalhamento (FIGURA 4).

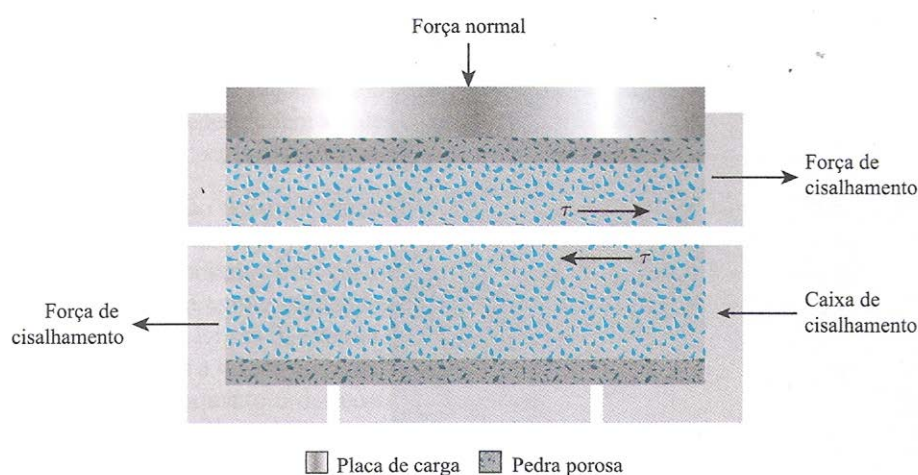


Figura 4: Diagrama do arranjo para ensaio de cisalhamento direto.

Fonte: DAS, 2013.

O corpo de prova, geralmente é mantido no interior do recipiente e preenchido com água para saturar o corpo de prova, este método é chamado de ensaio de cisalhamento drenado. Durante o ensaio o carregamento é lento o suficiente para que o excesso de poropressão gerado no solo seja dissipado completamente pela drenagem que é feita por meio de duas pedras porosas. Os ensaios são repetidos em corpos de prova similares e em várias tensões normais.

DAS (2013) destaca que apesar de o ensaio de cisalhamento direto ser simples de ser realizado, o mesmo possui algumas deficiências inerentes ao processo, como fato de que a confiabilidade dos resultados pode ser questionada uma vez que, o ensaio induz o rompimento da amostra ao longo do plano de separação das caixas de cisalhamento e não no plano mais fraco.

O mesmo autor aponta que além dos ensaios de laboratório convencionais, existem ainda, alguns equipamentos que podem ser utilizados in loco, como é o caso do penetrômetro de bolso, que é empurrado diretamente no solo, e por meio de uma escala, o aparelho indica a Resistência à compressão não confinada (q_u), medida através de uma mola calibrada. Já o Torvane, ou Vane test também utiliza mola calibrada, mas neste caso o instrumento mede a resistência ao cisalhamento não drenado, o aparelho também é empurrado para dentro do solo e depois girado até que o solo se rompa, isto deve ser realizado com cuidado e devagar, uma vez que a velocidade do giro interferirá no resultado.

2.6 ÂNGULO DE ATRITO INTERNO

O conceito de atrito entre os sólidos está fundamentalmente ligado ao conceito de movimento: o atrito surge quando se verifica tendência ao movimento. Levando em conta que só há movimento por ação de forças, pode-se entender o atrito como uma força resistente que se opõe à força provocada pelo deslocamento (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

De acordo com BORCHARDT (2005), o ângulo de atrito interno é o ângulo máximo que um determinado material pode assumir sem que haja rompimento de seu estado inercial, e que os solos com maior ângulo de atrito interno

possuem uma concentração maior de partículas da fração areia, isto devido ao fato que as areias possuem forma poligonal, logo esta irregularidade na forma possibilita atrito interno mais elevado que nas argilas, conforme mostra a Figura 5.

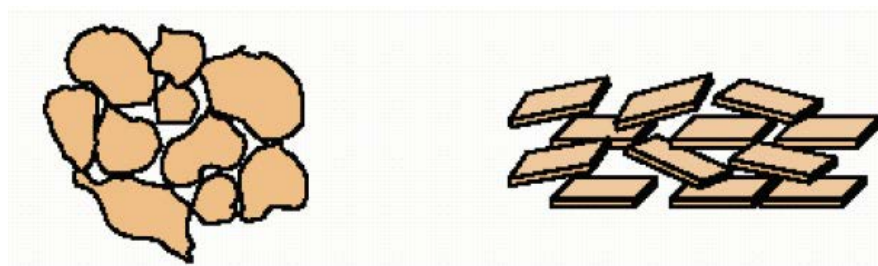


Figura 5: Partículas de areia: forma poligonal resulta em maior atrito interno.
Fonte: BORCHARDT, 2005.

O ângulo de atrito é um parâmetro de resistência ao cisalhamento de solos. A sua definição é derivado do critério de Mohr Coulomb e é usada para descrever a resistência de atrito ao corte dos solos, juntamente com a tensão efetiva normal.

DAS (2013) descreve os valores típicos para ângulo de atrito (ϕ) de alguns solos granulares, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Valores típicos do ângulo de atrito para areias e siltes

Tipo de solo		ϕ (graus)
Areia: grãos arredondados	Fofa	27-30
	Média	30-35
	Compacta	35-38
Areia: grãos angulares	Fofa	30-35
	Média	35-40
	Compactada	40-45
Pedregulho com alguma areia		34-48
Siltes		26-35

Fonte: DAS, 2013 (adaptado).

O GEOTECHDATA.INFO (2013a) compilou os valores encontrados para ângulo de atrito de acordo com o tipo de solo, conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6: Valores típicos para ângulo de atrito

Classificação USCS	Descrição	Valor médio (graus)	Valor de literatura (graus)
GW	Cascalho bem selecionado, cascalho arenoso com pouco ou nenhum fino	40 ± 5	40 ± 5 [1]; 30-35 [2]
GP	Pouco selecionado, cascalho arenoso, com pouco ou nenhum fino	38 ± 6	38 ± 6 [1]
GM	Cascalho siltoso, cascalho silto-arenoso	36 ± 4	36 ± 4 [1]
GC	Cascalhos argiloso, cascalhos silto-argilosos	34 ± 4	36 ± 4 [1]
SW	Areais bem selecionadas, cascalho arenoso, com pouco ou nenhum fino	38 ± 5	38 ± 5 [1]
SP	Pouco selecionados, cascalho arenoso, com pouco ou nenhum fino	34 ± 4	36 ± 6 [1]; 30 – 35 [2]
SM	Areno-argiloso	34 ± 3	34 ± 3 [1]
SC	Areno-siltoso	32 ± 4	32 ± 4 [1]
ML	Argila inorgânica, areias finas argilosas ou siltosas, com leve plasticidade	33 ± 4	33 ± 4 [1]
CL	Argila inorgânica, argilo-siltoso com baixa plasticidade	27 ± 4	27 ± 4 [1]
OL	Silte orgânico e argila-siltosa orgânica com baixa plasticidade	25 ± 4	25 ± 4 [1]
MH	Silte inorgânico com alta plasticidade	24 ± 6	24 ± 6 [1]
CH	Argila inorgânica com alta plasticidade	22 ± 4	22 ± 4 [1]
OH	Argila orgânica com alta plasticidade	22 ± 4	22 ± 4 [1]
Pt	Turfa ou outro solo altamente orgânico	5 ± 5	0 – 10 [2]

[1] Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers. [2] JON W. KOLOSKI, SIGMUND D. SCHWARZ, and DONALD W. TUBBS, Geotechnical Properties of Geological Materials, Engineering Geology in Washington, volume 1, Washington Division of Geology and Earth Resources Bulletin 78, 1989.

Fonte: Adaptado de GEOTECHDATA.INFO, 2013a.

2.7 ÁGUA NO SOLO

KELLER (1992) considera que na composição de um bloco de solo é possível observar vários minerais e matéria orgânica e a combinação destes materiais formam poros, estes por sua vez, preenchidos por gases (maior parte com ar), água ou outros líquidos. Se todos os poros do bloco estiverem preenchidos com água estará na condição de saturado. Isto ocorre em alguns solos em algumas partes do ano, enquanto que outros permanecem saturados durante todo o ano. Por exemplo, solos de mangues permanecem saturados e solos em regiões áridas talvez fiquem saturados uma vez ou outra.

HIGHLAND e BOBROSWKY (2008) destacam a saturação da vertente pela água como causa primária dos deslizamentos, uma vez que a saturação pode ocorrer em forma de precipitação intensa, derretimento de neve, mudanças nos níveis da água subterrânea e mudanças no nível de água superficial ao longo das costas ou de reservatórios naturais como lagos, canais e rios.

PINTO (1998) destaca a importância do estudo da percolação da água nos solos, uma vez que esta interfere em diversos problemas práticos, entre eles a estabilidade de taludes, uma vez que tensão efetiva depende da pressão neutra, sendo a tensão efetiva o principal agente que determina o comportamento do solo. O autor define que “a pressão neutra não interfere nas tensões de cisalhamento, pois estas ocorrem paralelamente ao plano considerado, e água não tem nenhuma resistência ao cisalhamento, ao contrário das partículas, que para se deslocarem devem vencer o atrito entre elas”.

A umidade faz-se sentir predominantemente na coesão do terreno, mostrando assim a influência da porcentagem da fração fina do solo sobre seu comportamento em termos de compacidade (CAPUTO, 1987).

Para ORTIGÃO (2007) a umidade tem pouca importância nas areias puras, o que não ocorre com as argilas, sendo a variação volumétrica dada pela expulsão da água dos vazios.

Para AHRENDT (2005) tantos estudos empíricos e analíticos avaliam dados de chuva em valores acumulados, porém a autora ressalta que é necessário dar importância também aos eventos de pequena quantidade, estes em geral se apresentam em maior frequência e tendem a manter a umidade do solo elevada ou em condição mais próxima da saturação. Logo dados pluviométricos são de extrema importância, além de reconhecido pela maioria dos pesquisadores, porém a autora ainda ressalta a não existência de trabalhos que quantifiquem a influência de períodos chuvosos mais prolongados.

Diante da importância de se conhecer o movimento da água no solo e sua influência na estabilidade de taludes, a bacia hidrografia deve ser considerada, uma vez que de acordo com TUCCI (1997) esta é compreendida com área de captação natural da água da precipitação que a direciona para um único ponto de saída (exutório), composta por um conjunto de vertentes e de uma rede drenagem. Logo a bacia hidrográfica controla todo o fluxo da água através da infiltração e do escoamento superficial.

2.8 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Com muita frequência, a água ocupa a maior parte ou a totalidade dos vazios do solo. Submetida a diferenças de potenciais, a água se desloca no seu interior (PINTO, 2000).

Ainda de acordo com o autor, o estudo da percolação da água é de suma importância já que este fenômeno está diretamente relacionado aos diversos problemas práticos quanto ao comportamento dos solos. Destaca-se os cálculos de vazões, as análises de recalques e especialmente na estabilidade de taludes uma vez que a pressão efetiva depende da pressão neutra que por sua vez depende das pressões provocadas pela percolação da água, no conjunto estas pressões comandam o comportamento do solo.

A diminuição da sucção, segundo BORCHARDT (2005) é dada pela infiltração contínua da água e elevação da umidade, mesmo antes da saturação total do maciço e em qualquer profundidade, isto dependerá da capacidade de retenção do solo. Como consequência há a redução da resistência ao cisalhamento em solos não saturados.

A altitude influencia, segundo VIEIRA (2007), na distribuição dos escorregamentos, visto que a quantidade de chuvas também varia de acordo com a altitude, ou seja, o efeito orográfico tende a intensificar a pluviosidade do local, mas deve-se analisar também outros fatores como a declividade. O autor ressalta que uma das principais propriedades hidrológicas que pode gerar planos de ruptura é a condutividade hidráulica.

KOZCIAK (2005) ressalta que a redução da condutividade hidráulica gera fluxos sub superficiais e isto diminui a resistência ao cisalhamento nas zonas de contato, e que além disso, a presença de grande quantidade de água aumenta o peso específico do solo, mas também a pressão neutra que favorece o deslocamento da massa pela ação da gravidade.

O fluxo pluviométrico de uma bacia hidrográfica, segundo BORCHARDT (2005), é dividido em componentes superficial e sub superficial, ou seja, fluxo dado pelo escoamento superficial e rios e subsuperficial dos lençóis freáticos.

Sabe-se que o solo exposto está sujeito a ação da água que consequentemente erode o mesmo. Dentro deste contexto GRIEBELER *et. al.*,

(2005) ressaltam a importância de se conhecer a capacidade resistiva do solo ao escoamento superficial e as características do escoamento, tanto superficial como subsuperficial, para um correto dimensionamento de um sistema de drenagem para controlar a erosão em locais onde há a necessidade de intervenção para evitar ou minimizar os escorregamentos.

VIEIRA (2007) Considera a precipitação pluviométrica como agente principal de deflagração dos movimentos de massa em regiões tropicais que não possuem atividades sísmicas, sendo importante avaliar parâmetros da distribuição espaço temporal dos escorregamentos tais como intensidade, duração e recorrência.

Nos últimos anos, o interesse pelo estudo dos solos residuais, que ocorrem com muita frequência em regiões tropicais, tem levado os engenheiros geotécnicos a estudarem também as variações de umidade na região do terreno acima do nível de água piezométrico (ORTIGÃO, 2007).

As chuvas não representam senão um dos aspectos a serem considerados na tentativa de análise de condições que conduzem ao aparecimento de escorregamentos. Inúmeros outros fatores atuam, já citados nos itens anteriores. Trata-se, entretanto, do aspecto mais significativo, distanciando-se dos demais fatores em importância. Se não todos, quase todos os escorregamentos registrados em nosso meio fisiográfico estão associados a episódios de elevada pluviosidade, de duração compreendida entre algumas poucas horas até alguns dias. A recíproca, entretanto, não é necessariamente verdadeira, isto é, a ocorrência de um elevado índice de pluviosidade é condição necessária, mas nem sempre é condição suficiente para o desencadeamento de escorregamentos. Há grande número de episódios de chuvas, de elevada magnitude, que parecem não ter gerado fenômenos de instabilização de vertentes (GUIDICINI & NIEBLE, 1983).

Observa-se que somente há uma correlação biunívoca entre chuvas e escorregamentos para índices de pluviosidade superiores a 250 – 300 mm com duração maior que uma semana. Episódios de chuvas desta intensidade parecem capazes de desencadear movimentos de massa praticamente em qualquer circunstância. Esta correlação, entretanto, deixa de ser válida para os índices de pluviosidade situados abaixo da citada, quando os episódios de chuvas capazes de causar escorregamentos se intercalam àqueles em que não foram registrados escorregamentos (GUIDICINI & NIEBLE, 1983).

[...] Em estações particularmente chuvosas, observar-se-á que a chuva acumulada tende a penetrar, sucessivamente, na faixa de posição superior, aumentando o nível de risco para a ocorrência de movimentos de massas. O risco não é representado simplesmente pelo fato da curva acumulada penetrar em determinada faixa, mas sim pela possibilidade de ocorrer um episódio de chuva intensa que venha se somar a uma curva acumulada de posição já elevada. Nessas condições, o lançamento em gráfico da curva de pluviosidade acumulada e seu acompanhamento e análise contínuos poderão indicar a cada instante, o risco ou nível de periculosidade acarretado por uma chuva intensa que venha cair subsequentemente [...] (GUIDICINI & NIEBLE, 1983).

AHRENDT (2005) descreve os diferentes comportamentos da água da chuva no solo, sendo que a saturação pode ocorrer de duas maneiras. A saturação da base ou ascendente, que é quando existe uma barreira para o movimento descendente da água, seja pela sobreposição de um solo mais permeável a um solo menos permeável ou pelo contato com a rocha, este contato ou sobreposição após um determinado tempo de chuvas acaba por elevar o nível freático e a pressão neutra que pode levar a ruptura. Já a segunda maneira é a saturação pelo topo ou descendente que é quando há perda de resistência, ocasionada pela diminuição da sucção existente em solos não saturados, a redução da sucção se dá pela elevação da saturação total, sendo que este tipo é mais comum em vertentes muito íngremes onde a estabilidade dependerá principalmente da coesão do solo incrementado pelas forças de sucção.

2.9 COBERTURA VEGETAL

Além das diversas modificações que ocorrem no solo devido a presença da água, a vegetação pode também desempenhar um papel importante na resistência do solo, uma vez que de acordo com KELLER (1992) as raízes de árvores podem fornecer considerável coesão aparente através das ligações características do tapete de raízes contínuas ou por ancorar raízes individuais em rochas sob solos finos em vertentes íngremes.

Nesse sentido GUIDICINI e NIEBLE (1983) descrevem que existe um consenso generalizado de que as florestas desempenham um importante papel na proteção do solo e de que o desmatamento pode propiciar não somente o aparecimento de erosão, mas também de movimentos coletivos de solos. Tal senso comum encontra-se nas opiniões da maioria quase absoluta de autores consultados e também de populações cuja atividade esteja ligada à exploração ou ocupação de vertentes.

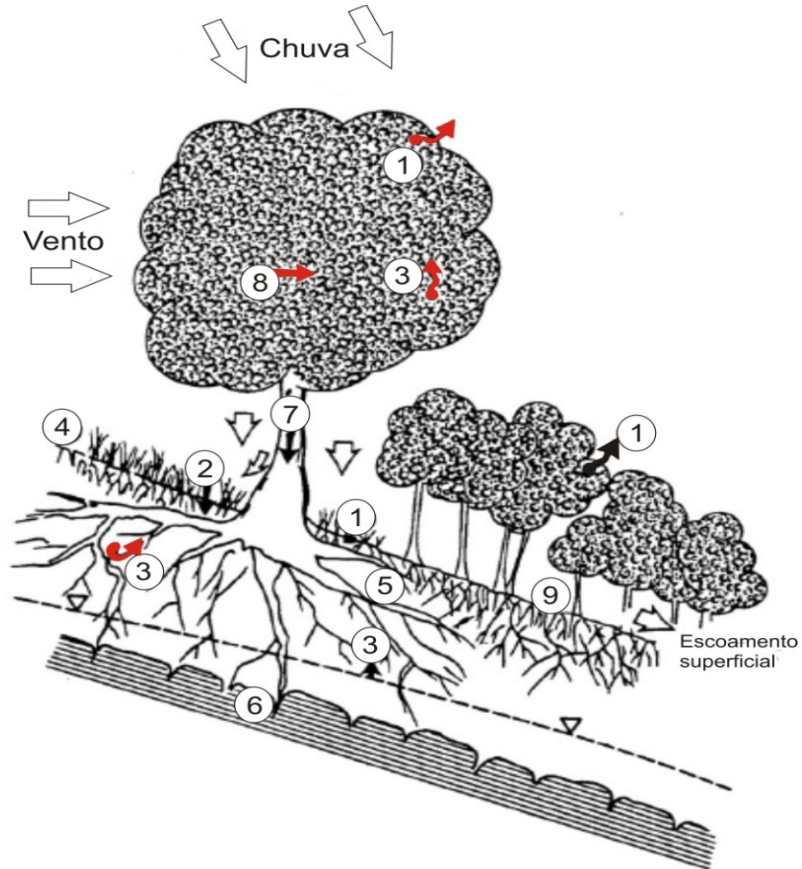
Dentre alguns benefícios dados pela presença da vegetação na vertente SESTINI (1999) discorre que de maneira geral esta protege o solo de fatores que condicionam os deslizamentos, reduz a compactação do solo pelo impacto de gotas de chuva e consequente diminuição do escoamento superficial, uma vez que a cobertura vegetal intercepta as águas pluviais reduzindo a energia cinética e favorecendo a infiltração, além de certos tipos de sistemas radiculares conterem a erosão por manterem a agregação do solo.

A remoção total da vegetação do talude pode produzir a formação de uma camada superficial impermeável pelo selamento superficial do terreno, ocasionado pelas partículas finas desagregadas que obstruem os poros do solo e impedem a infiltração, provocando o arrastamento de grandes quantidades de solo sobre a superfície (LEMES, 2001).

BORCHARDT (2005) descreve que para efeito de cálculos a pressão do peso da vegetação é obtido pela divisão do peso da árvore pela área de influência das raízes, sendo somente considerado para o caso de árvores, já que o peso das raízes de arbustos e gramíneas passa a ser insignificante.

Como visto dependendo do tipo de vegetação alguns efeitos adversos podem ser verificados se avaliarmos o peso das árvores e o tipo de sistema radicular, neste último pode-se destacar as raízes pivotantes que favorecem o fluxo de água vertical, além disso, temos ainda a força do vento na copa das árvores que transmitirá a pressão recebida ao solo.

A Figura 6 mostra as principais interações que ocorrem entre a vegetação, água da chuva e o solo.



Influência		
Hidrológica	1. Interceptação pela folhagem causa absorção e perdas por evaporação que reduzem disponibilidade para infiltração.	Benéfico
	2. Raízes e tronco aumentam a rugosidade da superfície e a permeabilidade do solo, levando ao aumento da capacidade de infiltração.	Adverso
	3. As raízes retiram umidade do solo pela evapotranspiração reduzindo a poro pressão da água.	Benéfico
	4. A redução da umidade pode acentuar craqueamento por ressecamento do solo, resultando em maior capacidade de infiltração.	Adverso
Mecânica	5. Raízes reforçam o solo, aumentando a resistência ao cisalhamento	Benéfico
	6. O ancoramento das raízes em locais mais estáveis ajuda a suportar o solo acima.	Benéfico
	7. O peso das árvores sobrecarrega a vertente, aumentando a tensão normal e de resistência (downhill force components).	Benéfico
	8. A vegetação exposta ao vento transmite a tensão a vertente	Adverso
	9. Junção das partículas do solo pelas raízes aumenta a rugosidade do solo e subsolo, consequentemente reduz a susceptibilidade a erosão	Benéfico

Figura 6: Interações da água da chuva-vegetação-solo.

Fonte: Adaptado de LEMES, 2001 e CORNFORTH, 2005.

2.10 VERTENTES E TALUDES

FIORI e CARMIGNANI (2009) descrevem talude como um termo genérico, que compreendendo qualquer superfície inclinada que limita um maciço de terra, rocha ou de ambos. Pode ser natural, caso das vertentes, ou artificial, quando construído pelo homem, caso dos cortes e aterros.

Do ponto de vista teórico, um talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de forças: as devidas ao peso, ao escoamento da água e à resistência ao cisalhamento (CAPUTO, 1987).

VELOSO (2002) aponta que a maioria dos projetos de construção civil estão relacionados às vertentes, especialmente as rodovias, já que o gradiente dos taludes não devem exceder padrões aceitáveis de estabilidade das vertentes para assim evitar deslizamentos e para que estes movimentos de massa possam ser evitados é necessário reduzir ao máximo o ângulo do talude, além de evitar o uso de aterros.

Para realizar análise de vertentes, tendo em vista avaliação de possíveis deslizamentos, CORNFORTH (2005) ressalta a necessidade de preciso mapa topográfico como sendo essencial para análise de áreas susceptíveis a movimentos de massa e para a preparação de documentos para remediação. Estes mapas podem ser obtidos através de levantamentos topográficos, batimetria, ou por fotogrametria.

2.11 TIPOS DE VERTENTE

BERVEGLIERI, MENEGUETTE JÚNIOR e PITERI (2010), destacam que a forma da vertente determinará o comportamento do fluxo da água que pode ser acelerado ou desacelerado, o que permite classificar a declividade facilitando o processo de intervenção. Estes autores adaptaram o modelo proposto por Valeriano em 2008, conforme mostra a Figura 7.

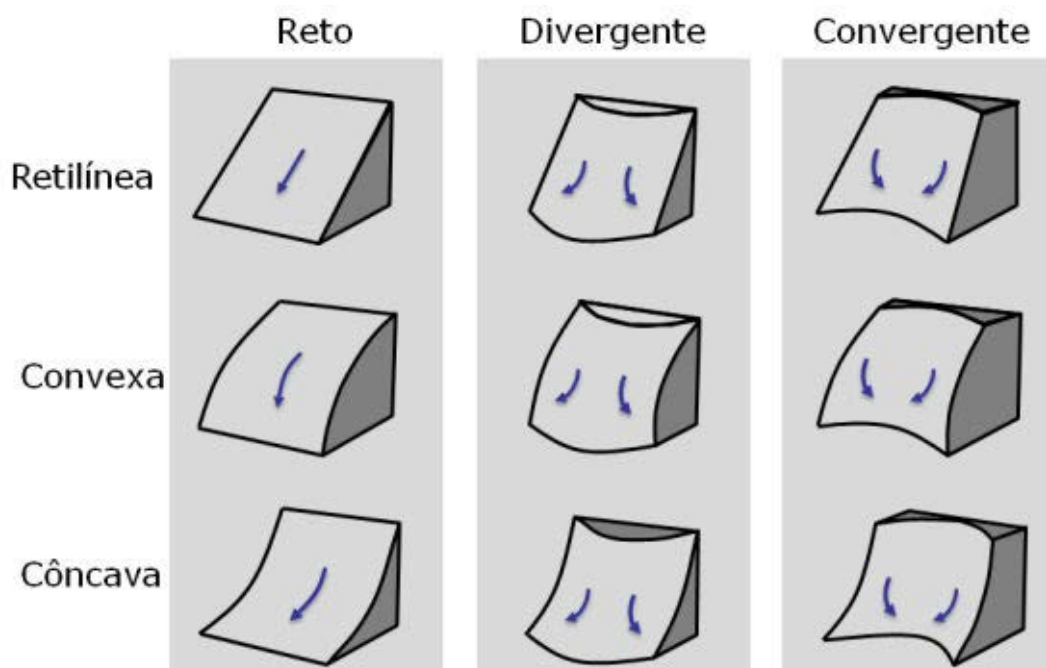


Figura 7: Curvatura da vertente em perfil e relação com o fluxo de água, representado pelas setas.

Fonte: BERVEGLIERI, MENEGUETTE JÚNIOR e PITERI, (2010) adaptado de VALERIANO (2008).

A inclinação da vertente contribui com o incremento da atuação da força gravitacional sobre a cobertura do solo, ou seja, quanto maior a declividade, maior será a componente vertical da gravidade (KOZCIAK, 2005).

SILVEIRA *et. al.*, (2012a) corrobora com a ideia de outros autores com relação a declividade como sendo um importante atributo topográfico que controla os processos pedogenéticos e que afeta diretamente a velocidade do fluxo superficial e subsuperficial da água e consequentemente controla o regime hídrico e o potencial de erosão ou de deposição.

Segundo FERREIRA (2013) dentre os parâmetros topográficos, a curvatura, especificamente a forma côncava tem recebido devida atenção, isto se dá pelo controle hidrológico nas zonas de convergência. No mesmo sentido BERVEGLIERI, MENEGUETTE JÚNIOR E PITERI (2010) chamam a atenção para o conhecimento sobre as características topográficas, por estarem relacionadas ao acúmulo de umidade e ao fluxo de água na vertente.

Vertentes são formadas por meios naturais ou por intervenção do homem. A Figura 8 mostra a relação entre os processos geomorfológicos dominantes em uma vertente.

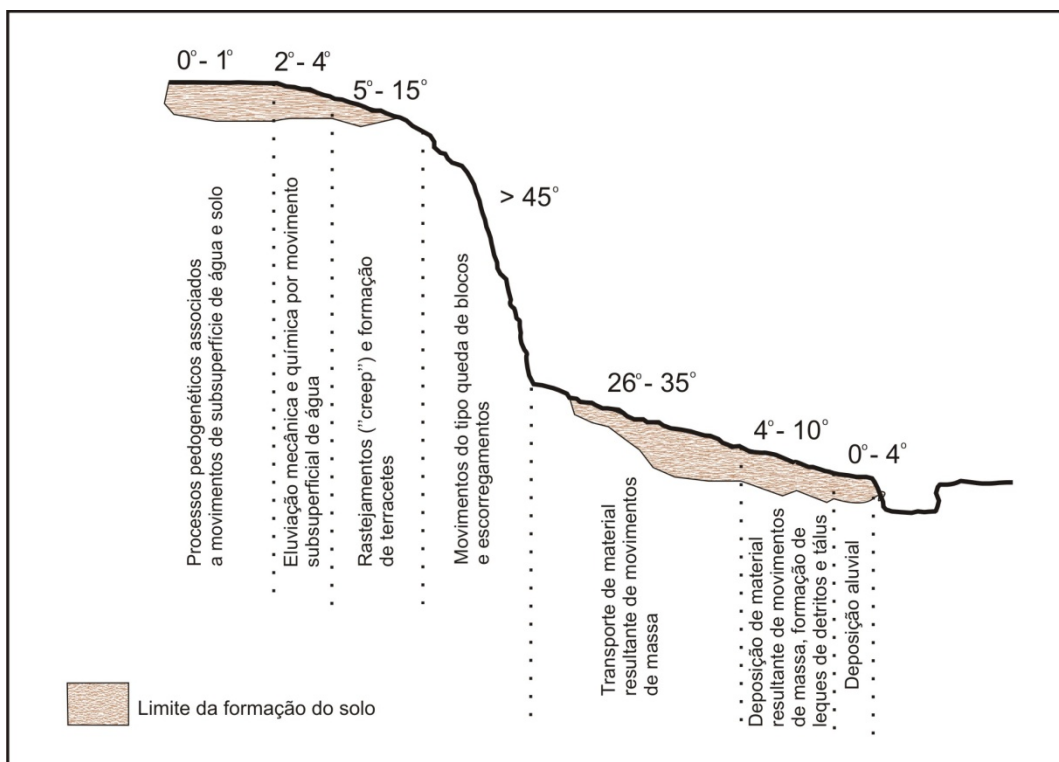


Figura 8: Processos geomorfológicos dominantes em uma vertente.

Fonte: Modificado de CLARK e SMALL, 1982 *apud* SESTINI, 1999.

KOZICIÁK (2005) ressalta que o atributo declividade, considerado para avaliação da maior ou menor possibilidade de ocorrência de movimentos de massa gravitacionais, deve sempre estar associado aos outros atributos existentes na área.

Em taludes compostos por materiais homogêneos ou pouco variados e espessos, BORCHARDT (2005) enfatiza que a perda da instabilidade se dá pela infiltração constante de água que acaba por modificar as condições iniciais do solo.

2.12 ESTABILIDADE DE VERTENTES

Uma das causas mais comuns e óbvias no desencadeamento de condições de instabilidade consiste em modificar as condições geométricas da massa terrosa, ou rochosa, que esteja sendo analisada, acrescentando-lhe uma

sobrecarga em sua porção superior, ou então retirando parte de sua massa na porção inferior (GUIDICINI & NIEBLE, 1983).

Segundo BORCHARDT (2005) os escorregamentos resultantes da perda de sucção associam-se a vertentes muito íngremes, onde a estabilidade depende da coesão do solo que é reforçado pelas forças de sucção.

Quanto a sua importância, basta atentar para os numerosos acidentes ocorridos, iminentes ou receados, em todas as épocas e em todas as partes do mundo (CAPUTO, 1987).

Em taludes naturais, grande parte das instabilizações ocorrem após períodos de chuva intensa ou estação chuvosa, demonstrando que pluviosidade é, se não o parâmetro mais importante, o mais indispensável nas análises de estabilidade (AHRENDT, 2005).

CAPUTO (1987) atribui às causas de um escorregamento o “aumento” de peso do talude (incluindo as cargas aplicadas) e a “diminuição” da resistência ao cisalhamento do material. As primeiras classificam-se como externas e as segundas como internas.

Existem duas categorias primárias que causam deslizamentos: fatores antrópicos e naturais. Algumas vezes, na pior dos casos, por uma combinação dos dois fatores.

Ainda de acordo com CAPUTO (1987) por conta da extrema diversidade de enfoque, à complexidade dos processos envolvidos e à multiplicidade de ambientes de ocorrência, o tema “escorregamentos” apresenta uma grande dificuldade de análise e síntese. Qualquer estudo de estabilidade de massas terrosas, ou rochosas, deve ser alimentado com um razoável conjunto de dados sobre o comportamento das águas subterrâneas.

2.12.1 Tipos de escorregamentos

A Figura 9 mostra os diferentes tipos de deslizamentos.

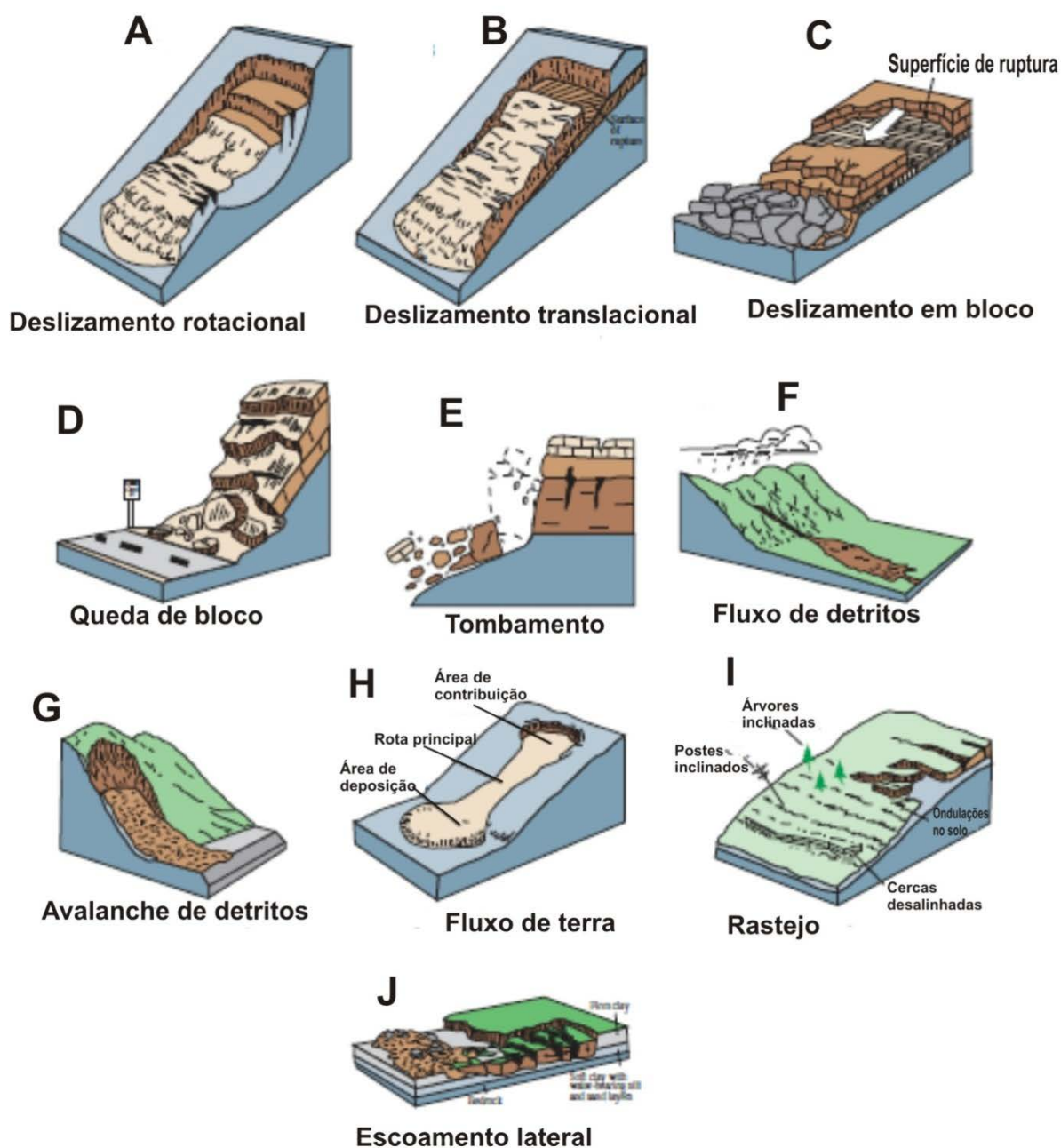


Figura 9: Tipos de escorregamento.

Fonte: USGS, 2004.

Os vários tipos de deslizamentos podem ser diferenciados pelos diferentes materiais envolvidos e no modo como o movimento ocorre.

Segundo a USGS (2004) alguns sistemas de classificação incorporam variáveis adicionais, como a velocidade do movimento, água, ar ou gelo contido no material do deslizamento.

Abaixo uma breve descrição baseada na classificação dos movimentos de massa definida por GUIDICINI e NIEBLE (1983):

- Escoamentos: representados por movimentos contínuos, com ou sem superfície definida no local de ocorrência, não está associado à velocidade e engloba movimentos lentos como no caso dos rastejos que estão associados a gravidade) ou os rápidos, neste caso as corridas que são essencialmente hidrodinâmicos como por exemplo as corridas de terra e avalanche de detritos;
- Escorregamentos: são movimentos rápidos, de duração relativamente curta em massas de terreno com volume bem definido. Divididos em escorregamentos rotacionais e translacionais. No primeiro a ruptura é influenciada pela distribuição das pressões neutras e pelas variações de resistência ao cisalhamento e pelo próprio peso, via de regra ocorre em forma de um arco de circunferência e em taludes mais íngremes. Por sua vez os translacionais podem ocorrer em solo ou em rocha, plano de movimentação ocorre paralelamente a vertente, este é condicionado por eventuais anisotropias acentuadas no interior da massa de solo ou rocha ou ambos;
- Queda de blocos: ocorre em penhascos verticais e vertentes muito íngremes onde os blocos se deslocam do maciço por ação da gravidade. Pode ser combinada a outros movimentos como saltos por exemplo. As causas podem ser erosão hídrica, variação da temperatura (variação do volume), perda do apoio, alívio de tensões tectônicas, vibrações, bem como podem ocorrer combinações entre as causas.
- Queda de detritos: é considerado um meio termo entre a queda de blocos e escorregamentos propriamente ditos. Composto de

fragmentos terrosos ou rochosos, inconsolidados ou pouco consolidados, em movimentos de pequena magnitude.

Além dos movimentos de massa descritos temos, ainda segundo o mesmo autor, outros movimentos de massa como é a subsidência, que na realidade não tem influência direta com a estabilidade de vertentes naturais, mas ainda sim são classificados como movimentos de massa. Assim como os recalques que são movimentos verticais da estrutura e provocadas geralmente pelo próprio peso. E ainda podemos citar os desabamentos que são formas de subsidência bruscas, onde a superfície entra em colapso.

AHRENDT (2005) define escorregamentos como consequência da deformação cisalhante, sendo possível que ocorra ao longo de uma ou mais superfícies e envolvendo materiais rochosos ou solo. Enquanto que KOZCIAK (2005) ressalta a alta susceptibilidade a escorregamento das áreas da Serra do Mar no Estado do Paraná, isto se deve a configurações paisagística e morfológica, sendo a combinação dos fatores naturais, tais como relevo acidentado, altos índices pluviométricos e a densa cobertura vegetal, fazem parte da geodinâmica evolutiva das vertentes, sendo o movimento de massa, mais especificamente o escorregamento o processo predominante de modificação da paisagem.

O termo deslizamento (USGS, 2004) descreve uma grande variedade de processos que resulta no movimento de descida ou de saída de materiais que formam uma vertente, incluindo rocha, solo, aterro ou uma combinação destes materiais. Os materiais serão movimentados por queda, desabamento, deslizamento, espalhamento, corrida.

2.13 MÉTODOS UTILIZADOS PARA A ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES

Vários são os métodos utilizados para estabilização de taludes. Alguns dos mais usuais são:

- Diminuição da inclinação do talude;
- Drenagem (superficial e profunda);

- Monitoramento por métodos geodésicos;
- Revestimento do talude;
- Emprego de materiais estabilizantes;
- Muros de arrimo e ancoragens;
- Utilização de bermas;
- Prévia consolidação da fundação, quando constituída por solos compressíveis;

Além de soluções especiais como, por exemplo, no caso de taludes rochosos, a associação de muros de arrimo e meio viaduto (CAPUTO, 1987).

A expansão da ocupação para novas terras e a criação de novas vizinhanças, cidade e distritos é em primeira análise como os humanos contribuem para a ocorrência de deslizamentos, segundo HIGHLAND e BOBROWSKY (2008) os distúrbios ou mudanças nos padrões de drenagem desestabiliza as encostas, além do que a remoção da vegetação é prática comum em áreas ocupadas. Como outros exemplos podemos citar o corte de vertentes, a sobrecarga no topo que excedem a resistência do solo.

Além da ocupação humana, SESTINI (1999) salienta que as variáveis relacionadas aos processos de movimento de massa atuam de forma interativa e, portanto, não devem ser analisadas isoladamente. A concomitância desses fatores nas estações chuvosas ou pouco depois – onde a saturação aumenta o peso específico do material e o excesso de umidade reduz a resistência ao cisalhamento pelo aumento da pressão neutra – explica a ocorrência da maioria dos escorregamentos nesses períodos de grande precipitação pluviométrica (CAPUTO, 1987).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo encontra-se inserida em um trecho da rodovia BR-376 que liga Curitiba/PR à Garuva/SC, e possui aproximadamente 3 km². Para a realização da presente pesquisa foi escolhida uma sub-bacia do Rio São João que faz parte da Bacia da Baía de Guaratuba (Figura 10).

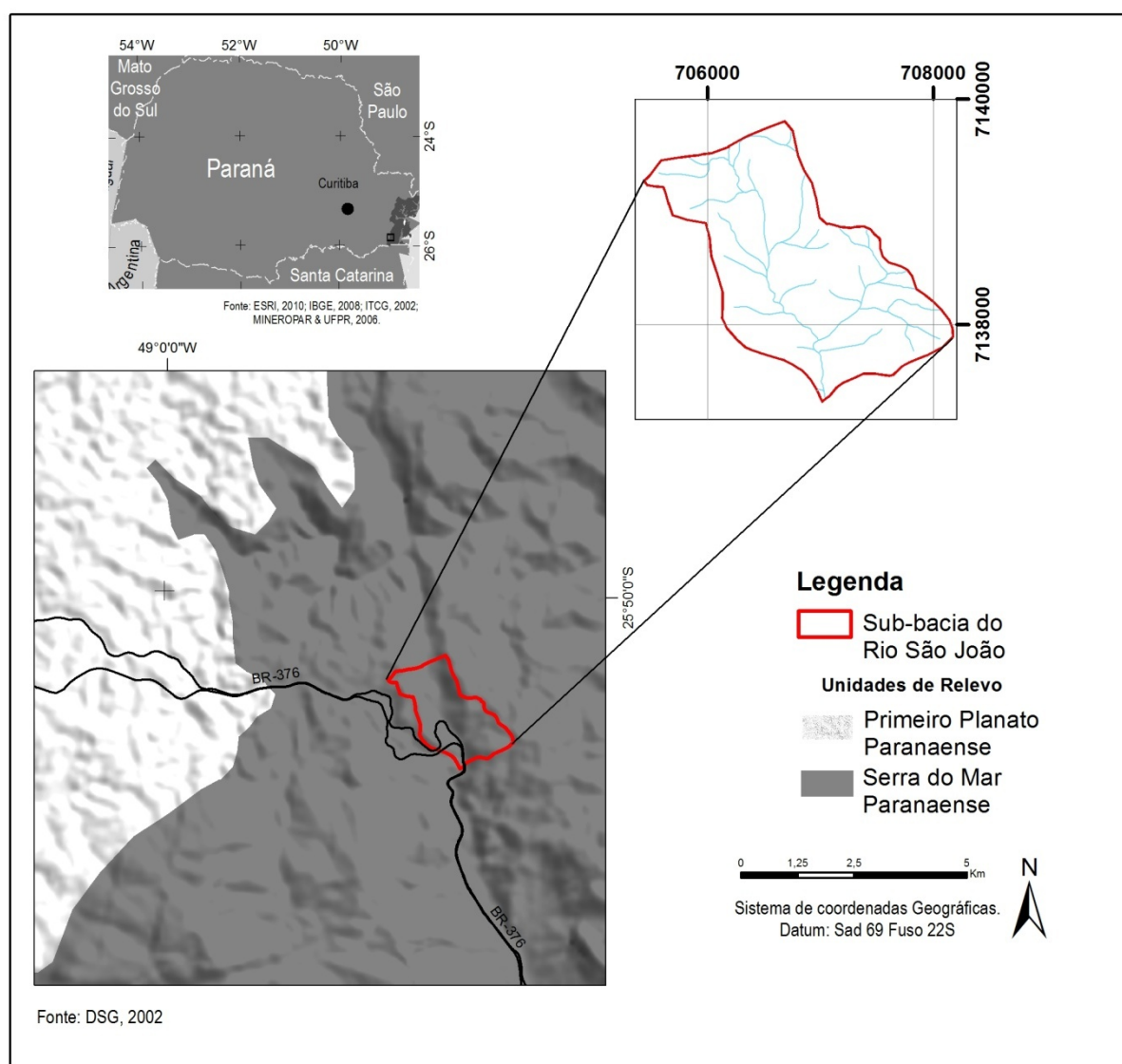


Figura 10: Localização da área de estudo.

O clima da área de estudo está inserido no grupo Cfb, segundo a classificação climática de Köppen, mostrado no mapa de classificação climática do Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR, 2013), Figura 11.

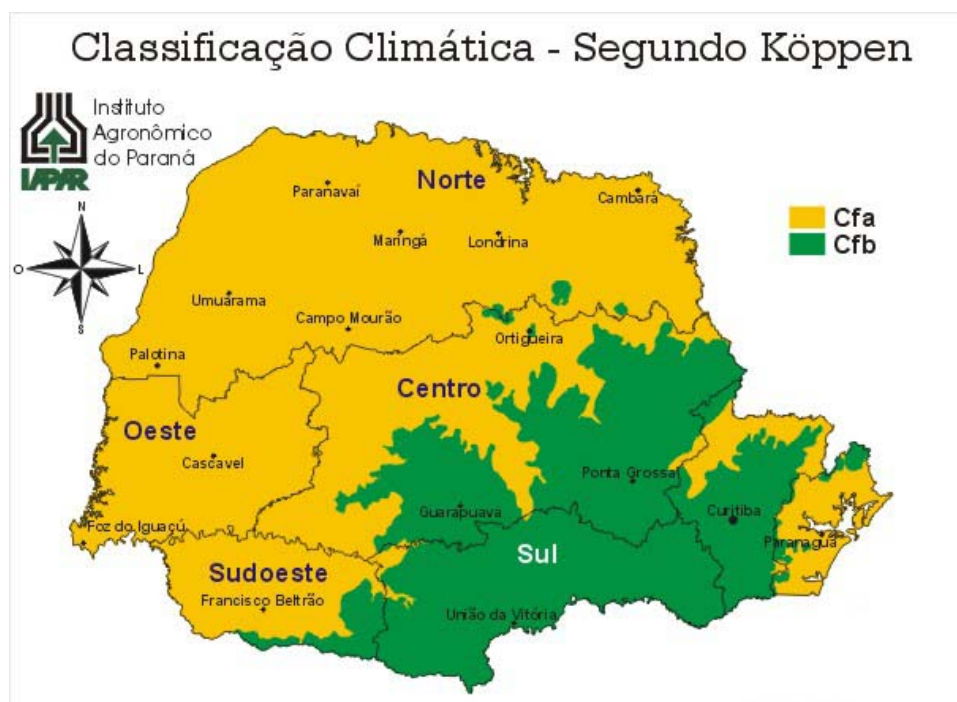


Figura 11: Mapa de classificação Köppen.

Fonte: IAPAR, 2013.

A área do presente estudo encontra-se totalmente na região classificada com Cfa que é descrita como clima sub-tropical ou clima temperado, com verão ameno. Chuvas uniformemente distribuídas, sem estação seca e com temperatura no mês mais quente em torno de 22° C. A precipitação varia entre 1100 e 2000 mm, sendo possível a ocorrência de geadas severas e frequentes, durante o inverno, em um período médio de ocorrência de dez a 25 dias anualmente.

A área de estudo está inserida nas sub-unidades morfoesculturais 1.1.2 e 1.1.3. As principais características da sub-unidade 1.1.2 são as Rampas de Pré-Serra (constituídas pelos colúvios) e Serras isoladas, articula-se entre a Serra do Mar e a Planície Litorânea, apresentando dissecações altas, com classes de declividade predominando entre 6 e 30%, o relevo apresenta gradiente de 400 metros (entre 200 e 600 metros acima do nível do mar), com topos alongados em crista e rampas dissecadas com vertentes retilíneas e vales em “V” modeladas em rochas da Suíte Álcali-Granitos e do Complexo Migmatítico. Já a sub-unidades morfoescultural 1.1.3 representa a Serra do Mar. As classes de declividade

predominantes estão entre 12 e 30%, com altitudes variando entre 20 a 1340 metros sobre o nível do mar. Sendo as formas predominantes são topos alongados e em cristas com vertentes retilíneas porém com vales em “V” encaixado. Apresenta direção geral da morfologia variando entre NE-SW, N-S e NW-SE, assim como na primeira sub-unidade também são modeladas em litologias da Suíte Álcali-Granitos e do Complexo Gnáissico Migmatítico.

De acordo com a Folha Curitiba da MINEROPAR (2006) a área possui unidade morfoestrutural da Bacia Sedimentar Cenozóica, Depressões Tectônicas e Cinturão Orogênico do Atlântico, sendo a área de estudo localizada apenas neste último (FIGURA 12).

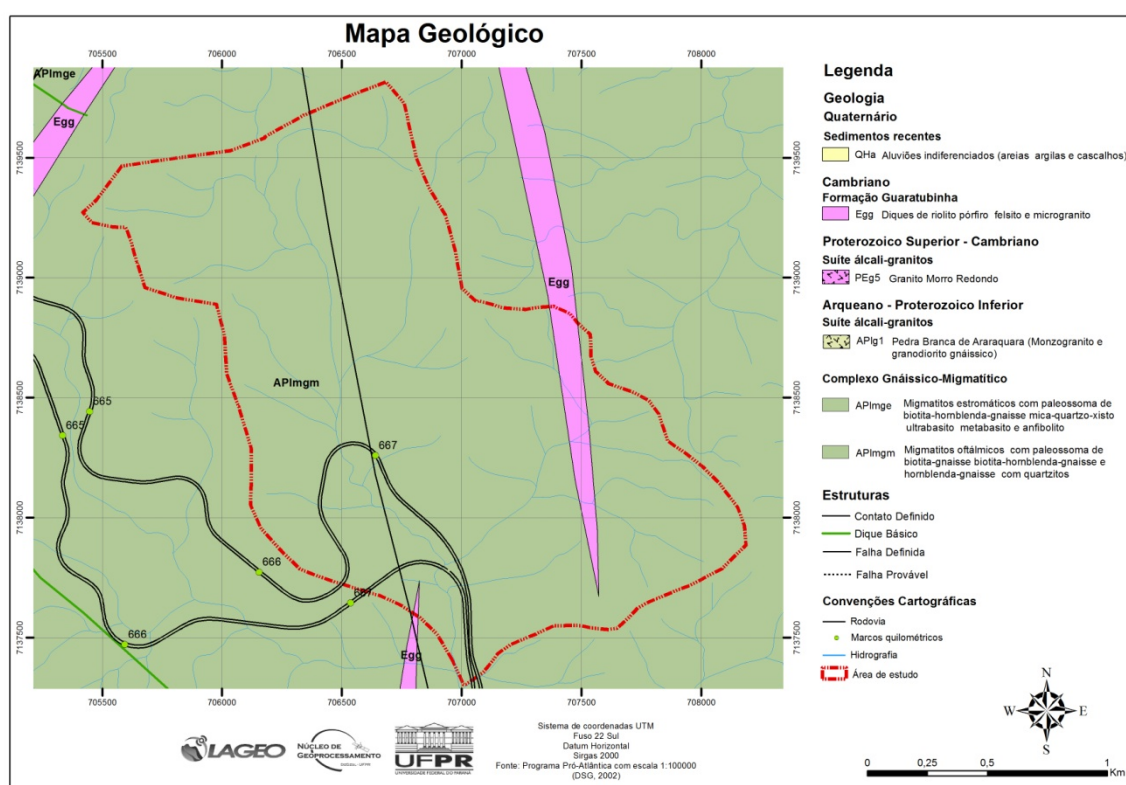


Figura 12: Folha Curitiba e localização da área de estudo.

Na região de estudo foram descritos como a geologia local rochas com idades do Período Proterozóico Superior/Paleozoico que são representadas pelos Complexos Granítico-Gnáissico e Gnáissico-Migmatítico, Suíte Álcali-Granitos quanto ao Paleozóico Inferior são descritas na Formação Guaratubinha e as Intrusivas Básicas.

Na região de estudo foram descritos como a geologia local rochas com idades do Período Proterozóico Superior/Paleozoico que são representadas pelos

Complexos Granítico-Gnaissico e Gnáissico-Migamatítico, Suíte Álcali-Granitos quanto ao Paleozóico Inferior são descritos a Formação Guaratubinha e as Intrusivas Básicas.

As informações utilizadas para análise e descrição da geologia na área de estudo foram obtidas das Cartas Geológicas 1:50.000 do Programa Pró-Atlântica e de seu respectivo relatório, organizados e confeccionado por MINEROPAR (2002) em convênio com a Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA) através do PRÓ-ATLÂNTICA, cuja área do projeto engloba a Planície Litorânea a Serra do Mar e parte do Primeiro Planalto.

Geologia local:

Complexo Granítico-Gnáissico

As intrusões desse complexo são formadas por monzogranitos e granodioritos gnáissicos, porfiróides a equigranulares, apresentando dois corpos granitóides: Pedra Branca de Araraquara e Serra Canavieira.

O granitóide Pedra Branca do Araraquara ocupa a porção geográfica sul e o Serra Canavieira a porção norte. Esses granitóides são formadores das serras da Boa Vista, do Engenho, Guarapari, Araraquara, e outras.

Entre os seus litotipos predominam anfibólio-biotita-granitóides porfiríticos, tendo como encaixantes xistos aluminosos, sequências paragnáissicas com biotita-gnaisses, mica-xistos, quartzitos, com frequentes intercalações de anfibolitos e unidades de ortognaisses. Faixas miloníticas espessas são frequentes em meio aos granitóides. O tipo mais comum é um granitóide a base de quartzo, plagioclásio, microclíneo, biotita e/ou hornblenda. Opacos, zircão, apatita e titanita são os principais minerais acessórios, (MINEROPAR, 2002).

Estruturalmente estes granitóides mostram-se heterogeneamente deformados com megacristais, principalmente K-feldspato, na forma de augen. Em certos locais observa-se uma fina clivagem, subordinada às feições ígneas, de fluxo magmático. Faixas miloníticas desenvolvidas em zonas de cisalhamento são frequentes e estão relacionadas a falhas transcorrentes ou de cavalgamento, com sentido de transporte para oeste, (MINEROPAR, 2002).

As determinações radiométricas Rb-Sr em rocha total e U-Pb em zircões, de anfibólio-biotita-granitóides, definiram idades entre 570 e 620 Ma. Estas idades são interpretadas como relativas à época de período principal da formação e

deformação destas rochas e a razão inicial é considerada como alta demais para representar derivação mantélica. Idades modelo Sm-Nd relativas ao setor ocidental deste domínio (tipo Rios Canasvieiras e Estrela) indicaram idades entre 2,6 e 2,7 Ga, distintas das observadas para os granitóides da porção centro oriental (tipo Morro Inglês) de intervalo 2,2 - 1,9 Ga. O padrão sugere épocas distintas para a derivação mantélica dos precursores crustais dessas rochas. As idades K-Ar em biotitas e anfibólios destes granitóides concentram-se entre 560 e 480 Ma e caracterizam o resfriamento regional deste domínio, (TEIXEIRA, 1982; BASEI *et. al.*, 1990; SIGA JR. *et. al.*, 1995 *apud* MINEROPAR, 2002)

Complexo Gnáissico-Migmatítico

Encontram-se as seguintes associações litológicas desse complexo recentemente redefinido como Complexo Atuba: Migmatitos estromáticos com paleossoma de biotita-hornblenda-gnaiss, mica-quartzo-xisto, ultrabásito, metabásito e anfibolito; Migmatitos oftálmicos, com paleossoma de biotita-gnaiss, biotita-hornblenda-gnaiss e hornblenda-gnaiss, com quartzitos locais; Biotita Gnaisses; Gnaisses ocelares, interdigitados com migmatitos estromáticos, com ocorrência de gnaisses fitados e leucocráticos e xistos feldspáticos; Migmatitos indiferenciados, com anfibolitos e veios quartzo-feldspáticos associados a migmatitos “dent de cheval”, localmente pegmatitos e aplo-granitos; Noritos, enderbitos, charno-enderbitos, gnaisses, meta-quartzo-dioritos, metadioritos, metagabros, incluindo serpentinitos e esteatitos; Suíte granítica foliada granitos metassomáticos ou de anatexia indiferenciados.

Trata-se de um conjunto de migmatitos estromáticos, augen-gnaisses, gnaisses graníticos e fitados, rochas meta-ultrabásicas, metabasitos, anfibolitos e quartzitos. São frequentes as intercalações de corpos anfibolíticos, por vezes granatíferos, bem como de xistos magnesianos, desde lentes centimétricas até corpos métricos. São comuns feições relacionadas a uma segunda fase de migmatização, com mobilizados róseos (K-feldspato), concordantes ou não ao bandamento gnáissico. A associação de noritos, enderbitos, charno-enderbitos, etc, corresponde mais apropriadamente a um complexo granulítico. Dentro deste conjunto foram reconhecidas duas tendências cálcio-alcálicas: uma tonalítica (norito-enderbítica) e outra norito-jotunito-opdalito-charnoquítica. Em termos metamórficos,

foi identificada neste setor do Complexo um evento de recristalização com temperaturas na ordem de 800°C, dentro do fácies granulito. A suíte granítica foliada, anatexítica e metassomática está inserida no Complexo Gnáissico-Migmatítico pela íntima relação com os migmatitos encaixantes, em contraste com as rochas granitóides do Complexo Granítico-Gnáissico referido anteriormente, consideradas intrusivas, (MINEROPAR, 2002).

Proterozóico Superior / Paleozóico

Suíte Álcali-Granitos

Trata-se de um magmatismo em regime extensional pós-orogênico. Ocorrem diversos corpos graníticos no setor sudeste do Paraná e nordeste de Santa Catarina, individualizados principalmente em projetos realizados na década de 1960 e 1970, organizados no programa Carta Geológica.

Esses maciços graníticos apresentam dimensões variadas, constituindo desde pequenos stocks até batólitos, cujas denominações têm por base a toponímia regional onde ocorrem: Anhangava, Graciosa, Alto Turvo, Rio do Salto, Morro Redondo, Marumbi, Serra da Igreja e Agudos do Sul. Distribuem-se tanto no domínio Curitiba quanto no Cráton Luís Alves, predominando sobre o último, não ocorrendo nos terrenos pertencentes ao domínio Paranaguá (batólito Paranaguá). Caracterizam-se esses maciços pela natureza alcalina, pela textura equigranular e pela isotropia, em contraste com a pronunciada foliação dos gnaisses e migmatitos encaixantes, com os quais os contatos são normalmente realizados através de zonas de falha, (MINEROPAR, 2002).

Paleozóico Inferior

Formação Guaratubinha

As associações litológicas dessa formação são: diques de riolito pórfiro, felsito e microgranito; sequência vulcânica ácida riolitos, tufo e brechas; sequência sedimentar: arcósios, siltitos, argilitos e conglomerados; sequência vulcânica intermediária: andesitos e dacitos.

A Formação Guaratubinha aparece predominantemente na porção oeste, nos municípios de São José dos Pinhais e Tijucas do Sul, e de modo menos significativo no município de Guaratuba.

As rochas vulcânicas da Formação Guaratubinha foram reconhecidas primeiramente por FUCK *et. al.*, (1967) *apud* FUCK *et. al.*, (1969), que a descrevem como sendo constituída por uma associação de vulcanismo de composição ácida e intermediária e de uma sequência sedimentar repousando em discordância sobre migmatitos e rochas graníticas associadas. A sequência vulcânica ácida compreende riolitos, ignimbritos, tufo, brechas vulcânicas e microgranitos, repousando diretamente sobre os gnaisses e migmatitos, recortados localmente por diques de microgranito, riolitos, pórfiros e felsitos, esses microgranitos contêm em sua composição quartzo, ortoclásio, sanidina, ferromagnesianos e plagioclásios, sendo acessórios zircão, fluorita, clorita, epidoto e opacos. Outra sequência vulcânica, de composição intermediária, é constituída por lavas e tufo andesíticos, além das de composição dacíticas, com textura geralmente porfírica, à base de plagioclásio, piroxênio e opacos, além de quartzo e zeólitas que preenchem cavidades. A sequência sedimentar compreende arcósios, siltitos, argilitos e conglomerados que ostentam comumente uma coloração castanho-avermelhada, observando-se nos primeiros uma preservação de estratificação plano-paralela denotando marcante ritmicidade deposicional, enquanto que, nos conglomerados a estratificação revela também um arranjo gradacional de seixos e finos leitos de material arcossiano. As relações estratigráficas entre as litologias dessa formação não estão ainda claramente definidas.

Todo o conjunto da formação apresenta intensamente perturbado com inclinações que variam de 20° a 80°, sendo comuns as zonas de cisalhamento, com zonas de cataclase, também evidências de uma estrutura do tipo sinclinal. Por suas semelhanças litológicas e estruturais, a Formação Guaratubinha é correlacionada ao Grupo Castro (no Paraná) e à Formação Campo Alegre, do Grupo Itajaí (em Santa Catarina). As direções estruturais do conjunto Guaratubinha são geralmente NE-SW correspondendo, genericamente, às direções estruturais dos migmatitos que constituem o seu embasamento, (FUCK *et. al.*, 1969).

A idade U-Pb em zircões de 602 ± 11 m.a. é interpretada como relativa à época de formação das rochas vulcânicas desta bacia. Os dados isocrônicos Rb-Sr

em rocha total de riolitos indicaram idade de 560 ± 10 e Ri de 0,70947 (SIGA JR., 1990 *apud* MINEROPAR, 2002).

Colúvios (Qc)

Sob a denominação colúvios incluíram-se sedimentos associados as vertentes da serra, nos quais não se observam evidências de transporte por fluxos de baixa viscosidade. Trata-se de sedimentos predominantemente finos, com proporções variáveis de areia e seixos, geralmente, sem estruturas. Os seixos podem estar dispersos na matriz ou concentrados em níveis ou linhas (stone lines). É frequente a ocorrência de mais de um colúvio superposto, com características texturais, ou de coloração diferentes, podendo ocorrer solos enterrados. Alguns colúvios parecem ter sido originados por processos de movimentos de massa lentos, envolvendo o manto de intemperismo, porém, as linhas de seixos e os solos enterrados atestam a complexidade de sua evolução (ANGULO 2002).

Depósitos de Tálus (Qt)

Os depósitos de tálus (Qt) são observados ao longo das escarpas principais da Serra do Mar, constituídos de blocos angulares e subarredondados de diversos tamanhos, imersos em matriz siltica ou argilosa, sem estruturas sedimentares. Datam do Holoceno. No sopé das vertentes mais íngremes da serra, frequentemente ocorrem acúmulos de sedimentos, cujas superfícies de deposição formam rampas de forte inclinação. Essas rampas não apresentam evidências de processos fluviais, ocorrendo aparentemente um predomínio do processo de queda de detritos. Os sedimentos que formam essas rampas íngremes foram interpretados como depósitos de tálus (ANGULO 1992).

Segundo informações da base de dados utilizadas no trabalho, composta pelo Mapeamento Geológico do Pró-Altântica, os depósitos de tálus são mais frequentes nas baixas vertentes.

3.2 Procedimentos metodológicos

Para a confecção do presente estudo foram utilizados relatórios de sondagem fornecidos pela concessionária OHL que administra a rodovia, além de cartas topográficas em curvas de nível equidistantes 10 metros. As visitas à campo foram realizadas entre os meses de outubro, novembro e dezembro de 2013.

SILVEIRA (2010) descreve em sua tese a associação de informações de solo-relevo combinada ao uso de ferramentas de geoprocessamento. A partir de um modelo com curvas de nível e pontos cotados, o software utilizado faz varreduras lineares (*rasters*) que cria o perfil do terreno e o resultado é a obtenção do Modelo Digital do Terreno (MDT) que representa a superfície a partir de pontos que descrevem a elevação tridimensional. Com base em atributos gerados pelo MDT permite a geração de um conjunto de variáveis que refletem processos geomorfológicos, hidrológicos, subordinados às condicionantes climáticas da região.

Devido ao fato que os atributos, tanto primários como secundários podem ser divididos quantitativamente em classes, cada classe recebe um valor. Para a combinação de dados foi empregada técnica de tabulação cruzada no aplicativo *ArcGis*® versão 10.1.

Após a inserção dos dados o aplicativo divide a área em quadrículas chamadas pixels, todos os pixels têm o mesmo tamanho que pode ser definido pelo usuário, em termos práticos quanto menor o pixels maior será o nível de detalhe e a resolução obtida.

Para obter mapa previsional de solos através de metodologia desenvolvida para o projeto, apresentada no Relatório Parcial nº. 5 (FIORI *et. al*, 2014). A modelagem dos tipos de solos superficiais foram agrupados em três etapas principais: a) elaboração dos atributos topográficos e geração de um Mapa previsional de solos de toda a área; b) validação do mapeamento em campo; c) etapas de classificação, validação e correção de dados espúrios.

Com base nos mapas planialtimétricos elaborado pelo Programa de Proteção da Floresta Atlântica – Paraná (PRÓ-ATLÂNTICA) do Instituto de Terras,

Cartografia e Geociências (ITCG), estes mapas planialtimétricos utilizados como base em escala 1:25.000.

No ambiente do software de informações geográficas, ArcGis versão 10.1 (ESRI, 2012). Ocorreu o processamento do MDT em grade regular com algoritmo ANUDEM (*Topo to Raster*). Sendo que o processo de geração de grade regular consiste em estimativa dos valores de cota de cada ponto de grade a partir de um conjunto de amostras de entrada que podem ser espaçadas regular ou irregularmente. Este método difere-se de outros métodos de interpolação, por gerar MDT's hidrológicamente corretos e com grade regular que possibilita a estimação de inúmeras variáveis do terreno. Para definição da resolução espacial do pixel no arquivo de saída, definiu-se em 10x10 metros.

A partir da construção dos MDE's foi possível realizar processamento dos atributos topográficos que serviram como base para elaboração do mapa preliminar de solos. Foram utilizados como atributos topográficos:

- a) Índice de Posição Topográfica (IPT) que mede a elevação de um ponto central e a média da elevação ao seu redor, em um raio predeterminado. Sendo valores positivos para posições mais elevadas e os valores negativos representam os locais mais baixos, como terço inferior das vertentes, ou seja, solos de origem coluvionar. Como este índice pode ser afetado pela escala, foi utilizado como medida interna 10 pixels e externa de 13 pixels. Após a aplicação de filtro, agrupamentos com menos de 9 células, foram eliminados. A delimitação entre os tipos de solo foi obtida pela média dos dados obtidos pelo IPT que se adequaram as curvas de nível de maneira fidedigna;
- b) Índice topográfico de umidade (ITU): usado para caracterização da distribuição espacial de zonas de saturação superficial. Este prevê a saturação onde a área de contribuição é grande, geralmente em segmentos convergentes, predominantemente na base de vertentes côncavas, o ITU se associa também o caminho preferencial da água, devido aos gradientes de umidade no perfil do solo. Após a discretização dos dados, realizada a partir da análise do histograma de distribuição dos valores de cada pixel, sendo considerados como classes com alta concentração de

umidade os pixels com valores superiores a 15, indicando ambientes com processos aluvionares.

O modelo de ocorrência apoiado no IPT foi possível indicar a distribuição dos solos residuais e coluvionares. Já o ITU foi utilizado para a detecção das áreas com ocorrências aluvionares sobre os colúvios. Finalmente, a partir do mapa geológico os solos residuais foram organizados em 3 classes distintas: 1) Solos residuais gnáissicos-migmatíticos; 2) solos residuais graníticos-gnaissicos e 30 solos residuais de outras litologias. Sendo indicadas, também no mapa, as áreas de afloramento rochoso, apoiado no inventário realizado em imagens de satélite de alta resolução e ortofotos.

A visita buscou a caracterização dos tipos de solo quanto sua formação e rocha de origem buscando uma melhor compreensão das suas propriedades geológico-geotécnicas e, conseqüentemente, das condições de estabilidades das vertentes que compõe a região de estudo, além da validação do mapa de solos.

3.2.1 Amostragem

3.2.1.1 Resistência à penetração – Standart Penetration Test (SPT)

O Standart Penetration Test (SPT) é reconhecidamente a mais popular, rotineira e econômica ferramenta de investigação em praticamente todo o mundo, permitindo uma indicação da densidade de solos granulares, também aplicado à identificação da consistência de solos coesivos e mesmo de rochas brandas (SCHNAID, 2000).

CINTRA *et. al.*, (2013) descrevem o SPT como um ensaio de penetração dinâmica que consiste de três etapas: I) perfuração; II) amostragem; e III) ensaio penetrométrico. Sendo as etapas II e III simultâneas, enquanto a I é alternada com II/III em cada metro da sondagem.

De acordo com os estudos de PINTO (2000) a resistência à penetração é também conhecida como o número N do SPT, ou simplesmente, como SPT do solo

Os solos podem então ser classificados através da compactidade, quando se tratar de areia ou silte argiloso, ou pela consistência para o caso das argilas ou silte argiloso. Esta classificação se dá em relação à resistência à penetração.

Devido ao fato que as sondagens são utilizadas grande parte das construções no país. A execução, equipamentos e análise precisaram ser normatizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A norma referente a classificação do solo quanto a resistência a penetração dos solos é regida pela NBR 6484 de 2001 (ABNT, 2001). A classificação de compactidade e consistência relacionadas ao índice de penetração dos solos está apresentada na Tabela 7.

Tabela 7: Tabela dos estados de compactidade e de consistência.

Solo	Índice de resistência à penetração N	Designação ⁽¹⁾
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa (o)
	5 a 8	Pouco compacta (o)
	9 a 18	Medianamente compacta (o)
	19 a 40	Compacta (o)
	≥ 40	Muito compacta (o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média (o)
	11 a 19	Rija (o)
	> 19	Dura (o)

⁽¹⁾ As expressões empregadas para a classificação da compactidade das areias (fofa, compacta, etc.), referem-se à deformabilidade e resistência destes solos, sob o ponto de vista de fundações, e não devem ser confundidas com as mesmas denominações empregadas para a designação da compactidade relativa das areias ou para situação perante o índice de vazios críticos, definidos na Mecânica dos Solos.

Fonte: ABNT, 2001.

SCHNAID (2000) descreve o ensaio SPT como sendo uma medida de resistência dinâmica conjugada a uma sondagem, esta utilizada para reconhecimento. A perfuração é realizada por tradagem e circulação de água que utiliza um trépano de lavagem como ferramenta de escavação, um amostrador padrão com diâmetro externo de 50 mm coleta amostras representativas a cada metro de profundidade.

Ainda de acordo com a NBR 6484:2001 (ABNT, 2001), *N* é a abreviatura do índice de resistência à penetração SPT, onde a determinação é dada pelo número de golpes correspondentes à cravação de 30 cm do amostrador-padrão,

após a cravação inicial de 15 cm, sendo utilizada uma corda de sisal para levantar o martelo padronizado.

No que se refere à associação entre o SPT e o estado do solo, deve-se considerar, inicialmente, que a energia de cravação que atinge o amostrador depende do sistema de cravação e do comprimento das hastes [...] (PINTO, 2000).

A amostragem feita na sondagem de simples reconhecimento provoca deformações sensíveis no solo. A amostra obtida é útil para identificação visual e para ensaios de caracterização. Não se presta, entretanto, para ensaios mecânicos em que a estrutura natural do solo deve ser preservada (PINTO, 2000).

SCHNAID e ODEBRECHT (2012) ressaltam que além da influência do equipamento, deve-se reconhecer os efeitos da influência das condições do solo na resistência à penetração. E como o comportamento do solo depende da trajetória de tensões e do nível de deformação a que são submetidos, o ensaio, teoricamente deveria impor um caminho de tensões e nível de deformações uniforme em toda a massa para que houvesse dissipação total da pressão neutra. Porém nenhum ensaio de campo satisfaz completamente essas condições, mesmo assim, os profissionais que utilizam os ensaios de SPT encontram no ensaio um método que funciona efetivamente e que determinam índices e informações que não podem ser obtidos de forma mais econômica e simples que por outros métodos.

SCHNAID e ODEBRECHT (2012) compilaram os fatores conhecidos que de alguma forma interferem na penetração dos solos granulares, bem como seus efeitos, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8: Influência das propriedades de solos granulares na resistência à penetração.

Fator	Influência	Referências
Índice de vazios	Redução do índice aumenta a resistência à penetração	Terzahi e Peck (1967); Gibbs e Holtz (1957); Holubec e D'Appolonia (1973); Marcusson e Bieganousky (1977)
Tamanho médio da partícula	Aumento do tamanho médio aumenta a resistência à penetração	Schultze e Menzenback (1961; DIN 4094; Clayton e Dikran (1982); Skempton (1986)
Coeficiente de uniformidade	Solos uniformes apresentam maior resistência à penetração	DIN 4094 – parte 2
Pressão neutra	Solos finos densos dilatam e aumentam a resistência, solos finos muito fofos podem liquefazer no ensaio	Terzahi e Peck (1967); Bazaraa (1967); De Mello (1971); Rodin <i>et. al.</i> , (1974); Dikran (1982)
Angulosidade	Aumento da angulosidade	Holubec e D'Appolonia (1973); DIN

das partículas	aumenta a resistência à penetração	4094
Cimentação	Aumenta a resistência	DIN 4094 – parte 2
Nível de tensões	Aumento da tensão vertical ou horizontal aumenta a resistência	Zolkov e Wiseman (1965); De Mello (1971); Dikran (1983); Clayton, Hababa e Simons (1985); Schnaid e Houlsby (1994b)
Idade	Aumento da idade do depósito aumenta a resistência	Skempton (1986); Barton, Cooper e Palmer (1989); Jamiolkowski <i>et. al.</i> , (1988)

Fonte: SCHNAID e ODEBRECHT, 2012.

Devido à disponibilidade de dados relativos a sondagens realizadas na área de estudo, os valores de resistência a penetração foram utilizados para obtenção de valores de ângulo de atrito e coesão, tudo isto em função da profundidade e N_{SPT} .

A correção do N_{SPT} foi realizada quanto a eficiência e à tensão confinante para uma tensão de referência de 100 kPa (N_1). Para tanto é necessário determinar a tensão vertical efetiva (σ_v') e o coeficiente de correção (CN) através das equações 1, 2 e 3 descritas por LIAO e WITHMAN (1986).

$$\sigma_v' = z \times \gamma_{nat} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

σ_v' – tensão vertical efetiva;

z – altura ou profundidade;

γ_{nat} – peso específico do solo natural.

$$CN = \sqrt{\frac{100}{\sigma_v'}} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

CN – coeficiente de correção;

σ_v' – tensão vertical efetiva.

$$N_1 = N_{spt} \times CN \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

N_1 – valor do N_{SPT} corrigido;

N_{SPT} – número de golpes;

CN – coeficiente de correção.

Para correção do N_{SPT} para um valor de referência, normalizado com base no padrão americano de N_{60} , onde a energia liberada é de 60%, e o valor utilizado como Energia aplicada é de 0,66, conforme indicado por SCHNAID (2000), a Equação (4) demonstra o cálculo da correção.

$$N_{60} = \frac{N_{spt} \times \text{Energia aplicada}}{0,60} \quad \text{Equação (4)}$$

Uma correlação direta com o N_{SPT} corrigido em relação à energia aplicada ao sistema e ao nível de tensões $(N_1)_{60}$, para o caso de materiais granulares foi proposta por HATANAKA e UCHIDA (1996), conforme mostra a Equação 5.

$$\phi = 20 + (15,4 \times (N_1)_{60})^{1/2} \quad \text{Equação (5)}$$

Já para o caso de materiais coesivos, de acordo com STROUD, (1989) o parâmetro a ser determinado é a resistência não-drenada (S_u), como apresentado na Equação 6.

$$S_u = 5 \times N_{60} \text{ (kPa)} \quad \text{Equação (6)}$$

Para encontrarmos a coesão e o ângulo de atrito utilizou-se a Equação (7).

$$\tau = \sigma_v' \times \tan \phi_{(N1)60} \quad \text{Equação (7)}$$

Caso a suposição seja para um material coesivo-friccional, com o valor da resistência ao cisalhamento é possível obter o valor da coesão (c') utilizando-se um valor fixo para ϕ (Equação 8).

$$c' = \tau - \sigma_{v0}' \times \tan \phi \quad \text{Equação (8)}$$

Após a realização de todas as etapas descritas nas Equações de 1 a 8, os dados foram organizados conforme mostra o exemplo na Tabela 9.

Tabela 9: Exemplo de organização para cálculo de ângulo de atrito e coesão.

Local	Amostra	z (m)	Nspt	⁽¹⁾ Ynat kN/m ³	σ_v' kPa	CN	N_1	N_{60}	$(N_1)_{60}$	ϕ (°)	S_u (kPa)	τ (kPa)	⁽²⁾ ϕ (°)	c' (kPa)
Km 667+120	SPT 04	1	5	18	18	2,36	11,79	5,50	12,96	34,13	27,5	12,20	31,76	1,38
		2	6	18	36	1,67	10,00	6,60	11,00	33,02	33,0	23,39	31,76	1,76
		3	6	18	54	1,36	8,16	6,60	8,98	31,76	33,0	33,43	31,76	0,98
		4	7	18	72	1,18	8,25	7,70	9,07	31,82	38,5	44,68	31,76	1,42
		5	8	18	90	1,05	8,43	8,80	9,28	31,95	44,0	56,13	31,76	2,06
		6	10	18	108	0,96	9,62	11,00	10,58	32,77	55,0	69,51	31,76	4,62

7	17	18	126	0,89	15,14	18,70	16,66	36,02	93,5	91,60	31,76	15,89
8	18	18	144	0,83	15,00	19,80	16,50	35,94	99,0	104,39	31,76	17,87
9	19	18	162	0,79	14,93	20,90	16,42	35,90	104,5	117,28	31,76	19,94
10	18	18	180	0,75	13,42	19,80	14,76	35,08	99,0	126,39	31,76	18,24

Legenda: z (m) – profundidade; N_{spt} – número de golpes; γ_{nat} - peso específico do solo natural; σ'_v – tensão vertical efetiva; Fatores de correção: CN , N_1 , N_{60} , $(N_1)_{60}$; Φ – ângulo de atrito; S_u – resistência não drenada; τ - tensão efetiva; c' – coesão. ⁽¹⁾ Valor obtido em Borchardt (2005) e Kozciak (2005). ⁽²⁾ Menor valor calculado.

Estes cálculos foram realizados em todas os 37 pontos de sondagem abordadas na presente pesquisa, o que resultou uma tabela para cada ponto de sondagem. Como resultado, obteve-se 37 tabelas, como mostrada acima. O grande volume de informação contida nas tabelas de cálculo está apresentado resumidamente no decorrer do texto.

3.2.1.2 Amostra indeformada para ensaio de cisalhamento direto

Para coleta de amostra indeformada a coleta deve ser realizada conforme recomenda a norma NBR 9604/1986 (ABNT, 1986).

PINTO (2000) descreve que amostras indeformadas do solo podem ser obtidas de duas maneiras:

- Na parede de poços ou taludes, contando-se cuidadosamente um bloco prismático do solo (25x25x25 cm, por exemplo) e revestindo-o com parafina para que não perca a umidade. Este bloco deverá ser posteriormente guardado em câmara úmida;
- Pela cravação de amostrador de paredes finas, por meio de um sistema que não produza impacto (cravação dinâmica). Estes amostradores são conhecidos pelo nome de “Shelby”: amostrador “Shelby” e amostras “Shelby”. Amostradores com diâmetro de 7,5 a 10 cm são comuns, os maiores são nitidamente melhores, pois é menor o efeito do atrito na parede central da amostra.

A profundidade da base dos blocos variaram entre 1 e 1,5 metros, estas variações se deram para que as amostras ficassem, o máximo possível, livres de

raízes e pedregulhos, portanto a escavação procedeu até que o solo orgânico não estivesse mais presente. O procedimento de coleta foi realizado segundo descrito na norma NBR 9604 (ABNT, 1986).

A retirada das amostras indeformadas foi realizada através da abertura de uma trincheira (FIGURA 13a), onde blocos cúbicos com 30 cm de aresta foram moldados (FIGURA 13b), cobertos com parafina e tecido (FIGURA 13c e 13d), identificação do topo dos blocos e acondicionamento nas caixas de transporte protegidos por serragem (FIGURA 13e e 13f).



Figura 13: Procedimento de coleta e armazenamento dos blocos de amostra indeformada.

KOZCIAK (2005) descreve o ensaio de cisalhamento direto como o mais antigo procedimento utilizado para determinar a resistência, sendo o ensaio baseado diretamente no critério de Coulomb. Uma tensão normal é aplicada ao plano até que ocorra a ruptura, tendo assim a tensão cisalhante.

3.2.2 Fator de Segurança

A fim de comparar a estabilidade das vertentes em condições diferentes de equilíbrio é definido o Fator de Segurança (FS).

O fator de segurança é a razão entre as forças resistentes ao deslizamento e a resultante das forças solicitantes. A condição especial de equilíbrio-limite corresponde a um FS de valor igual a 1,00, e nesse caso, o escorregamento é eminente. Quanto maior for o valor acima da unidade, maior a estabilidade da vertente e, por consequência, menor a susceptibilidade de ocorrência desse processo (SILVEIRA et. al, 2012a).

FIORI e CARMIGNANI (2009) realizaram uma série de deduções matemáticas e relações entre os diversos fatores que influenciam no cálculo do Fator de Segurança para estabilidade dos taludes. O presente estudo baseou-se na teoria do equilíbrio limite em taludes infinitos, conforme descrito pelos autores.

A análise baseada na teoria de equilíbrio limite considera que as forças que tendem a induzir a ruptura são exatamente balanceadas pelos esforços resistentes.

Segundo KOZCIAK (2005) determinar o índice de segurança tem sido uma forma de representar a maior ou menor susceptibilidade a movimentos de massa em regiões de serra, sendo o mapeamento pela teoria da estabilidade de taludes. A aplicação dos dados em um programa computacional aliado a técnicas de SIG permite a avaliação de grandes áreas, sendo que os resultados são apresentados em forma de mapas que facilita e auxilia o planejamento territorial baixo custo operacional, além de apresentar resultados confiáveis.

Em seus estudos LOOK (2007) correlaciona quais os fatores de dependência do fator de segurança, conforme mostra a Tabela 10.

Tabela 10: Dependências do Fator de Segurança

Variável	Efeito no Fator de Segurança	Comentário
Resistência <ul style="list-style-type: none"> • Menor valor • Quartil inferior • Médio 	O quartil inferior é tipicamente utilizado. Mais alto ou mais baixo deve corresponder a mudanças ou ao Fator de segurança aceitável	Refere-se a valores que não devem ser utilizados quando não há parâmetros de resistência de solos e rochas
Geometria <ul style="list-style-type: none"> • Altura • Vertente • Bancadas • Estratificação/ Descontinuidades 	Vertentes mais altas em um dado ângulo serão mais instáveis que vertentes de pouca altura. Planos de mergulho em direção a face do talude influenciam no resultado	Bancadas também são usadas para reduzir a erosão, como forma de manutenção da plataforma
Carga <ul style="list-style-type: none"> • Peso • Sobrecarga • Condições da água 	A água é a variável mais significativa. Peso unitário submerso então atinge estabilidade crítica baixa em parte da vertente. O solo acima é mais pesado que o solo abaixo	O peso age como força de dispere e de restauração
Métodos analíticos <ul style="list-style-type: none"> • Método de fatias • Método de cunha 	Métodos diferentes (alguns programas de computador) produzem resultados diferentes para os mesmo dados. O momento equilíbrio e a força equilíbrio, algumas vezes produzem resultados distintos, especialmente com a aplicação de carga externa	Probabilidade de falhas/ critério de deslocamento também podem ser considerados em casos críticos. Fatores de segurança para 3 – efeito de dimensão ~15% maior do que análises em 2-D

Fonte: LOOK, 2007

O conceito de Fator de Segurança pode ser definido pela razão entre as forças resistentes pelas forças atenuantes, conforme mostra a Equação 9.

$$FS = \frac{\text{Forças resistentes}}{\text{Forças atenuantes}} \quad 9 \quad 10 \quad \text{Equação (11)}$$

Para obtenção valor do Fator de Segurança, foi utilizada a equação descrita por FIORI e CARMIGNANI (2009), para taludes infinitos e levando em consideração a influência da vegetação, conforme Equação 10.

$$FS = \frac{(C_s + S_r)[(h_1 \gamma_{nat} + h_2 \gamma_{sub} + Pa) \cos^2 i + T \sin \theta] \tan \phi + T \cos \theta}{[(h_1 \gamma_{nat} + h_2 \gamma_{sub} + h_2 \gamma_a + Pa) \sin i + F_{ve}] \cos i} \quad \text{Equação (12)}$$

Onde:

FS – Fator de segurança;

C_s – Coesão do solo (kPa);

S_r – Contribuição das raízes para coesão total do solo;

h – Altura da zona de solo, perpendicular a vertente (cm);

γ_a – Peso específico da água (kN/m³);

P_a - Peso das árvores;

i – Inclinação da vertente (graus);

T – Tensão das raízes;

F_{ve} – Força do vento (kPa)

Vários autores utilizam a equação 10 de diversas maneiras, considerando-se que para obter distintos cenários, é preciso apenas determinar qual será a variável que sofrerá modificação para obter resultados diferentes, como por exemplo, caso seja necessário obter resultados para uma área que primeiramente foi calculado Fator de Segurança considerando a vertente vegetada, pode-se igualar a zero os valores referentes a influencia da vegetação para que se obtenha o respectivo valor para a vertente sem cobertura vegetal.

Desta maneira é possível modificar praticamente todos os valores utilizados no cálculo para ter como resultado um cenário específico que dependerá da necessidade de estudo de um possível evento em determinadas condições.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 *Visitas ao sítio de estudo*

4.1.1 Caracterização do solo e locação das amostras indeformadas

Ao longo da rodovia observou-se três tipos principais de solo: Solos residuais, solos coluvionares e tálus. Um tipo particular de solo residual estratificado foi observado no km 682.

De um modo geral, os solos residuais são de cores amareladas ou avermelhadas, bastante argilosos, frequentemente evidenciando estruturas reliquias da rocha matriz. Em relação à rocha matriz, observou-se dois tipos principais: solos residuais de migmatitos e solos residuais de granito.

Os solos residuais de migmatitos são os mais abundantes e caracterizam-se pela predominância das cores amareladas, bastante argilosos e compactos. Nesse tipo de solo é frequente a presença de estruturas reliquias da rocha matriz, caracterizada por níveis de colorações esbranquiçadas, devido à maior concentração de minerais félsicos como feldspatos e quartzo, e níveis de colorações mais marrons/avermelhados devido à maior concentração de minerais máficos na rocha matriz, como micas do tipo biotita e anfibólios. A granulometria dos minerais reliquias é de média a grossa.

Os solos residuais de granito caracterizam-se por cores mais avermelhadas. A exemplo dos solos residuais de migmatitos são também bastante argilosos e compactos. Diferenciam-se dos primeiros tanto pela cor mais avermelhada como pela ausência de estruturas reliquias na forma de níveis de colorações diferenciadas da rocha matriz. A estrutura reliquia observada nesse tipo de solo é caracterizada por um aspecto granulométrico, dado pela alteração intempérica de feldspatos, produzindo cores claras e de minerais máficos, que resultam cores avermelhadas. A granulometria dos minerais reliquias é grossa. Boas ocorrências desse tipo de solo podem ser observadas no trecho da rodovia entre os km 659 e km 667.

Os solos identificados como depósitos de tálus caracterizam-se pela presença de blocos de rocha, geralmente granitos e migmatitos, de tamanhos e formas muito diversificadas, imersos em uma matriz argilo-arenosa. É comum nesse tipo de solo a presença de blocos de rochas de dimensões de matacões (dimensões métricas), bem como fragmentos menores, geralmente quartzosos, de alguns centímetros de comprimento. Há, no entanto, toda uma gradação de tamanhos de fragmentos rochosos dentro dos depósitos tálus. Boa ocorrência desse tipo de solo pode ser observada no Km 669.

Os solos coluvionares caracterizam-se pelas cores marrom avermelhado ou amarelado, tipo tijolo, de matriz argilo-arenosa e sem evidências de estruturas reliquias da rocha matriz. Ocorrem sobre solos residuais, sendo em alguns casos, bem marcada a transição entre ambos, especialmente por uma brusca mudança de coloração. Localizam-se principalmente nos topos mais aplainados ou nas porções inferiores das vertentes. Aparentemente a espessura desse tipo de solo é bastante irregular.

No total foram locados 11 pontos com presença de solo residual sendo, dois (02) de paragnaisse, cinco (05) de granito e quatro (04) de migmatito. As amostras de solo coluvionar somam cinco (05) unidades. Não foram, em campo, identificados pontos com presença de solo aluvionar e aterros que pudessem influenciar o modelo em desenvolvimento nesta pesquisa por este motivo, estes não foram locados.

A locação dos pontos de coleta de amostra indeformadas aconteceu no dia 26 de setembro de 2009, quando a equipe de pesquisadores do projeto percorreu a rodovia no trecho entre Curitiba e proximidades de Garuva com o objetivo de locar os pontos para coleta de amostras indeformadas. Ao todo foram locados 15 pontos. Dos pontos locados, cinco encontram-se na área de estudo. Com relação à disposição física das vertentes foram realizados estudos para obtenção de mapas para melhor visualização da área, bem com a utilização destas informações como fonte de dados indiretos para obtenção de características e parâmetros que serão apresentados a seguir.

4.1.2 Sondagens SPT

A partir dos dados de sondagem fornecidos pela Concessionária OHL, as informações relevantes para o estudo foram avaliadas, quanto a presença ou não de coordenada geográfica para que os pontos de sondagem pudessem ser espacializados nos mapas.

Além da avaliação, toda informação obtida por meio dos boletins de sondagem foram organizados para que posteriormente fossem realizados os cálculos para obtenção dos valores referente a ângulo de atrito e coesão do solo.

Esta foi a primeira etapa de análise de resultados da presente pesquisa e foi baseada na delimitação da área de estudo, foram selecionados sete unidades amostrais. Optou-se por dividir as sondagens em unidades amostrais, uma vez que a localização dos pontos de sondagem escolhidos com base no km da rodovia. Ao todo foram avaliados 37 pontos de sondagem SPT para obtenção de valores de ângulo de atrito e coesão por meio da correlação com o NSPT.

Dentre as informações fornecidas, há desde 2008 um acompanhamento e registro de todos os eventos de deslizamentos que ocorrem na rodovia e que afetaram o fluxo de veículos ou a estrutura da estrada.

As informações compiladas com relação ao local da unidade amostral, pista, número de amostras SPT, tipo de solo descrito, geometria, paisagem, data da ruptura, agente deflagrador e tipo de movimento estão dispostos na Tabela 11, a seguir.

Tabela 11: Caracterização das unidades amostrais.

Local	Pista	n° amostras SPT	Tipo de solo	Geometria	Paisagem	Data da ruptura	Deflagrador	Tipo de movimento*
667+120	Norte	5 A; 4 B	Coluvio, solo residual, rocha alterada	Corte	Vegetação	11/03/11 - 13/03/11	Chuva	Circular

667+160	Norte	5	Solo residual	Corte	Vegetação	06/12/2010	Chuva	Circular
667+230	Norte	8	Solo residual	Aterro	Vegetação	11/03/11 - 13/03/11	Chuva	Planar
667+300	Norte	5	Solo residual	Corte	Vegetação	11/03/11 - 13/03/11	Chuva	Planar
667+710	Sul	2	Aterro, colúvio, solo residual	Aterro	Vegetação rasteira	01/11/2008	Erosão	Não identificado
667+900	Norte	7	Solo residual	Corte	Presença de vegetação	11/03/11 - 13/03/11	Chuva	Vários

* Classificação, conforme consta nos relatórios da OHL.

4.1.2.1 Unidade amostral KM 667+120 A e B

Nestas unidades amostrais, segundo levantamentos feitos pela concessionária OHL, ocorreu um escorregamento entre os dias 11 e 13 de março de 2011, sendo o solo caracterizado pela presença de colúvio e a ruptura apresentou característica de deslizamento circular.

Foram realizadas na área duas etapas de sondagem SPT, a primeira (km 667+120A) entre os dias 06 e 08 de janeiro de 2011 que amostrou 5 pontos e a segunda (km 667+120B) entre os dias 13 e 19 de setembro de 2011 realizou mais 5 pontos amostrais.

O tipo de solo, profundidade e valores médios por profundidade obtidos para ângulo de atrito e coesão estão dispostos na Tabela 12.

Tabela 12: Caracterização da unidade amostral km 667+120A

Unidade amostral	Amostra	Cota (m)	Profundidade (m)	Tipo de solo	Ângulo de atrito	Coesão kPa
km 667+120 A	SPT 01	598,68	0 - 0,9	Argila orgânica, marrom	30,94	1,22

		0,9 - 4,7	Argila siltsa, vermelha, mole	29,72	1,70	
		4,7 - 13,5	Argila siltosa com areia de textura variada, marrom, média e rija	33,00	1,72	
		13,5 - 20,45	Argila siltosa, marrom e amarela, dura	35,17	14,51	
		Abaixo de 20,45	Limite de sondagem			
	SPT 02	607,27	0 - 0,1	Argila orgânica, marrom	30,94458	0,81425
			0,10 -1,2	Argila siltosa, vermelha, mole	30,7858	1,08619
			1,2 - 4,0	Argila siltosa,marrom, mole	30,52969	1,54404
			4,0 - 11,0	Argila siltosa com areia de textura variada, marrom, rija	32,0661	9,56873
			11,0 - 20,45	Argila siltosa, marrom e amarela, rija e dura	32,9935	27,3068
			Abaixo de 20,45	Limite de sondagem		
	SPT 03	591,40	0,0 - 4,0	Argila siltosa, marrom, média	34,19372	6,55056
			4,0 - 13,5	Argila siltosa, amarela e marrom, rija e dura	33,39132	18,9051
			13,5 - 15,45	Argila siltosa, variegada, rija	32,46609	26,0512
			Abaixo de 15,45	Impenetrável		
	SPT 04	582,55	0,0 - 1,0	Argila siltosa com pedreas, marrom	34,1294	1,3849
			1,0 - 7,0	Argila siltosa, marrom e amarela	33,06623	4,01694
			7,0 - 10,45	Argila siltosa, variegada, rija e dura	35,73388	17,9847
			Abaixo de 10,45	Impenetrável		
SPT 05	586,34	0,0 - 1,7	Argila orgânica, marrom	30,97579	2,31574	
		1,7 - 11,0	Argila siltosa, marrom e amarela, mole à rija	32,79419	14,0307	
		11,0 - 15,45	Argila siltosa, variegada, rija e dura	34,6035	36,4953	
		Abaixo de 15,45	Impenetrável			

Nestes pontos de sondagem a profundidade do solo variou de 10,45 metros no SPT 04 e chegou a 20,45 metros no SPT 01 e SPT 02. É possível perceber o aumento dos valores para coesão estão diretamente relacionados com a profundidade dos solos, enquanto que os valores de ângulo de atrito estão mais relacionados com o tipo de solo e a consistência do mesmo.

Com relação a segunda campanha de coletas, a Tabela 13 caracteriza a unidade amostral.

Tabela 13: Caracterização da unidade amostral km 667+120B

Unidad e amostr al	Amostr a	Cota (m)	Profundidade (m)	Tipo de solo	Ângulo de atrito	Coes ão kPa
km 667+120 B	SPT 01	598,68	0,0 - 4,6	Argila siltosa, pouco arenosa amarela, mole a média	31,11	2,11
			4,6 - 5,8	Argila siltosa, amarela, média a rija	30,35	2,81
			5,8 - 14,42	Argila silto-arenosa, marrom clara, rija a dura	31,53	8,04
			Abaixo de 14,42	Impenetrável		
	SPT 02	607,39	0,0 - 4,48	Argila siltosa, vermelha, mole	30,53	1,54
			4,48 - 7,9	Argila silto-arenosa, vermelha, média a rija	32,37	8,68
			7,9 - 17,4	Argila silto-arenosa, vermela, dura	32,39	18,80
			Abaixo de 17,4	Impenetrável		
	SPT 03	614,10	0,0 - 5,49	Argila siltosa, amarela, mole a média	34,46	9,72
			5,49 - 15,40	Argila silto-arenosa marrom clara, rija a dura	32,97	20,37
			Abaixo de 15,4	Impenetrável		
	SPT 04	621,20	0,0 - 3,47	Argila siltosa, amarela, mole	32,72	1,43
			3,47 - 5,9	Argila silto-arenosa, marrom clara, média	32,11	2,32
			5,9 - 13,43	Argila silto-arenosa, marrom clara, média a dura	34,61	13,10
			Abaixo de 13,43	Impenetrável		

A profundidade, nesta unidade, variou de 13,43 metros (SPT 04) a 17,4 metros (SPT 02). O aumento dos valores de coesão, assim como na unidade amostral anterior, se deram com o aumento da profundidade, e a variação dos valores de ângulo de atrito e coesão estão ligados a consistência do solo e o tipo.

4.1.2.2 Unidade amostral KM 667+160

Nos registros referentes a esta unidade amostral, ocorreu um escorregamento do tipo circular no dia 06 de dezembro de 2010, o fator deflagrador descrito foi a ocorrência de chuvas e o solo caracterizado com o solo residual.

Foram realizadas 5 sondagens SPT, entre os dias 06 e 08 de janeiro de 2011, sendo que todos os furos de sondagem ocorreram no local do escorregamento.

Abaixo a Tabela 14 mostra as características do solo, profundidade e os valores relativos aos ângulo de atrito e coesão em cada camada de solo.

Tabela 14: Caracterização da unidade amostral km 667+160

Unidade amostral	Amostra	Cota (m)	Profundidade (m)	Tipo de solo	Ângulo de atrito	Coesão kPa
KM 667+160	SPT 01	599,44	0,0 - 0,9	Argila orgânica, marrom	30,79	1,70
			0,9 - 4,7	Argila siltosa, vermelha, mole	30,41	3,03
			4,7 - 13,5	Argila siltosa com areia de textura variada, marrom, média e rija	32,63	19,80
			13,5 - 20,45	Argila siltosa, marrom e amarela, dura	34,78	49,08
			Abaixo de 20,45	Limite de sondagem		
	SPT 02	597,57	0,0 - 0,1	Argila orgânica, marrom	30,94	0,81
			0,1 - 1,2	Argila siltosa, vermelha, mole	30,79	1,09
			1,2 - 4,0	Argila siltosa, marrom, mole	30,53	1,54
			4,0 - 11	Argila siltosa com areia de textura variada, marrom, rija	32,07	9,57
			11,0 - 20,45	Argila siltosa, marrom e amarela, rija e dura	32,99	27,31
			Abaixo de 20,45	Limite de sondagem		
	SPT 03	584,35	0,0 - 4,0	Argila siltosa, marrom, média	34,19	6,55
			4,0 - 13,5	Argila siltosa, amarela e marrom, rija e dura	33,60	18,86
			13,5 - 15,45	Argila siltosa, variegada, rija	32,47	26,05
			Abaixo de 15,45	Impenetrável		
	SPT 04	583,30	0,0 - 0,1	Argila siltosa, com pedregulhos, marrom	34,13	1,38
			1,0 - 7,0	Argila siltosa, marrom e amarela	33,07	4,02
			7,0 - 10,45	Argila siltosa, variegada,	35,73	17,98

	SPT 05	587,20		rija e dura		
			Abaixo de 10,45	Impenetrável		
			0,0 - 1,7	Argila orgânica, marrom	30,98	2,32
			1,7 - 11,0	Argila siltosa, marrom e amarela, mole à rija	32,78	14,05
			11,0 - 15,45	Argila siltosa, variegada, rija e dura	34,60	36,50
			Abaixo 15,45	Impenetrável		

Percebe-se que esta unidade amostral apresenta solos com espessura mínima de 10,45 metros sendo que o máximo não foi possível ser determinado já que por solicitação do cliente a sondagem não passou de 20,45 metros de profundidade. Os valores de ângulo de atrito mantiveram-se acima de 30° chegando ao maior valor encontrado foi 35,73° no SPT 04 entre 7 e 10,45 metros de profundidade. Com relação a coesão, bem como em outras unidades amostrais, variou conforme a profundidade chegando até 49,08 kPa.

4.1.2.3 Unidade amostral KM 667+230

Nos registros referentes a esta unidade amostral, ocorreu um escorregamento do tipo circular no dia 06 de dezembro de 2010, tendo como fator deflagrador a ocorrência de chuvas, o solo do local é caracterizado com o solo residual.

Esta unidade amostral é a que apresenta maior número de pontos amostrais, no total foram realizados 8 sondagens SPT, entre os dias 06 e 08 de janeiro de 2011. A caracterização por profundidade, tipo de solo e valores de ângulo de atrito e coesão encontrados para este ponto amostral estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Caracterização da unidade amostral km 667+230

Unidade amostral	Amostr a	Cota (m)	Profundida de (m)	Tipo de solo	Ângulo de atrito	Coesã o kPa
KM 667+230	SPT 01	575,72	0,0 - 0,75	Argila arenosa, variegada, (avermelhada e marrom) com presença de pedregulhos e matéria orgânica	37,87	5,61
			0,75 - 3,6	Argila arenosa, coloração avermelhada, com presença	31,40	5,17

					de pedregulhos, média a mole		
					3,6 - 5,9	Argilo- arenosa, vareigada (avermelhada e pouco cinza esverdeado), mole	27,89 4,47
					5,9 - 7,7	Argila arenosa, avermelhada, com presença de pedregulhos, muito mole a média	26,96 4,93
					7,7 - 9,8	Argila arenosa, variegada, (avermelhada com perfis em preto), com presença de pedregulhos, muito mole	26,77 5,57
					9,8 - 11,6	Argila arenosa, avermelhada, com presença de pedregulhos, mole a rija	29,27 19,37
					11,6 - 14,5	Argila arenosa, variegada (avermelhada com perfis pretos), rija	33,58 47,64
					14,5 - 19,0	Argila arenosa, coloração variegada (amarelo, esverdeado e branco), dura	36,90 88,79
					19,0 - 20,45	Argila arenosa, variegada (avermelhada e marrom), dura	38,16 112,24
					Abaixo de 20,45	Limite de sondagem	
	SPT 02	568,57			0,0 - 3,8	Argila arenosa, avermelhada, com pedregulhos, entre muito mole e mole	28,17 2,82
					3,8 - 7,4	Argila, variegada (avermelhada e pouco esverdeada), com presença de pedregulhos, muito mole e mole	27,45 5,14
					7,4 - 10,5	Argila, variegada (amarelo, esverdeado, preto), com pedregulhos, entre rija e mole	30,14 19,09
					10,5 - 12,2	Argila, variegada (marrom escuro, amarelo e avermelhado), com pedregulhos, rija	30,81 26,17
					Abaixo de 12,2	Impenetrável	
	SPT 03	574,41			0,0 - 0,3	Argila arenosa, marrom, com matéria orgânica e pedregulhos	40,96 6,45
					0,3 - 1,0	Argila arenosa, marrom, com pedregulhos	40,96 6,45
					1,0 - 2,8	Argila arenosa, avermelhada, com matéria orgânica e pedregulhos, média a mole	34,45 5,11
					2,8 - 6,6	Argila arenosa, avermelhada, com pedregulhos, média a mole	29,92 4,65
					6,6 - 7,8	Argila pouco arenosa, avermelhada, com	29,22 6,41

			pedregulhos, mole		
			7,8 - 8,5	Argila arenosa, avervelhada com pedregulhos, média	29,65 8,84
			8,5 - 9,7	Argila pouco arenosa, variegada (marrom e pouco avermelhada), com pedregulhos e matéria orgânica, média	29,12 7,39
			9,7 - 12,4	Argila pouco arenosa, cinza esverdeada, de mole a rija	30,77 19,25
			12,4 - 16,7	Argila arenosa, variegada (marrom claro com perfis em branco) dura	38,23 72,02
			16,7 - 20,45	Argila arenosa, variegada (avermelhada com perfis branco) rija	39,20 101,7 1
			Abaixo de 20,45	Limite	
SPT 04	564,23	0,0 - 0,3	Argila arenosa, variegada (marrom e pouco avermelhado) com pedregulhos e matéria orgânica	28,94	1,17
		0,3 - 2,8	Argila pouco arenosa, avermelhada, com pedregulhos, muito mole	27,75	1,10
		Abaixo de 2,8	Impenetrável		
SPT 04A	565,29	0,0 - 0,5	Argila arenosa, marrom, com pedregulho e matéria orgânica	28,94	0,38
		0,5 - 2,5	Argila arenosa, avermelhada, com pedregulhos, média	29,97	2,03
		2,5 - 4,1	Argila arenosa, variegada (amarelo e pouco avermelhada), média	31,35	4,77
		Abaixo de 4,1	Impenetrável		
SPT 4B	563,82	0,0 - 0,7	Argila, marrom, com matéria orgânica, mole	32,64	0,28
		0,7 - 2,1	Argila arenosa, avermelhada, com pedregulho e matéria orgânica, mole	34,72	2,36
		Abaixo de 2,1	Impenetrável		
SPT 4C	563,24	0,0 - 2,4	Argila arenosa, variegada (avermelhada e marrom), com pedregulhos, mole a média	32,50	1,98
		2,4 - 3,3	Argila arenosa, variegada (avermelhada, preto) com pedregulhos, dura	37,21	9,14
		Abaixo de 3,3	Impenetrável		
SPT 5	576,76	0,0 - 0,8	Argila arenosa, avermelhada, com pedregulhos e matéria	28,94	1,17

	orgânica			
	0,8 - 1,7	Argila, variegada (avermelhado e marrom) com pedregulhos, mole	29,78	2,46
	1,7 - 5,5	Argila arenosa, avermelhada, com pedregulhos, muito mole a média	28,77	3,38
	5,5 - 10,4	Argila arenosa, variegada (avermelhada com perfis branco) com pedregulhos, média a dura	35,13	33,54
	10,4 - 12,6	Argila arenosa, variegada (avermelhado e preto) dura a rija	39,68	69,82
	12,6 - 16,8	Argila arenosa, variegada (amarelo, preto, esverdeado, branco) rija	34,70	54,61
	16,8 - 20,45	Argila arenosa, variegada (amarelo, pouco esverdeado e branco, dura	31,19	45,85
	Abaixo de 20,45	Limite de sondagem		

A maior variação de profundidades foi desta unidade amostral descrita na Tabela 15 (acima), neste caso a menor profundidade é a encontrada no SPT 04B com 2,1 metros e as maiores foram nos SPT 01 e SPT 03. Do mesmo modo que ocorreu com as demais unidades amostrais, os valores de coesão aumentam de acordo com a profundidade e os valores de ângulo de atrito e coesão variam segundo a consistência e o tipo de solo.

4.1.2.4 Unidade amostral KM 667+300

Esta unidade amostral possui registro de escorregamentos entre os dias 11 e 13 de março de 2011, ocasionado por chuva, nesta mesma data também houve ocorrência nas unidades amostrais 667+120, 667+230, 667+300 e 667+900. No caso desta unidade amostral a pista foi totalmente interditada por conta do deslizamento. O local possui solo residual onde foram amostrados 5 pontos, que apresentaram profundidades variando entre 5,1 metros (SPT 02A) e 15,8 metros (SPT 03). A caracterização desta unidade amostral está apresentada na Tabela 17.

Tabela 16: Caracterização da unidade amostral km 667+300

Unidade amostral	Amostra	Cota (m)	Profundidade (m)	Tipo de solo	Ângulo de atrito	Coesão kPa
Km 667+300	SPT 01	578,06	0,0 - 0,6	Argila, avermelhada, com pedregulhos e matéria orgânica	35,48	4,05
			0,6 - 2,8	Argila arenosa, avermelhada, com pedregulhos, mole a média	33,02	4,78
			2,8 - 3,6	Argila arenosa, marrom, mole	33,82	10,39
			3,6 - 8,1	Argila arenosa, variegada (marrom e branco) com pedregulhos, rija a dura	35,97	25,27
			Abaixo de 8,1	Impenetrável		
	SPT 02	587,52	0,0 - 0,7	Argila arenosa, avermelhada, com pedregulhos	46,05	7,86
			0,7 - 3,6	Argila arenosa, avermelhada e amarelada, com pedregulhos, rija a dura	40,85	9,43
			3,6 - 4,5	Argila arenosa, marrom, muito mole	34,73	5,57
			4,5 - 7,6	Argila arenosa, variegada (marrom e branco) com pedregulhos, média a dura	32,78	4,62
			Abaixo de 7,6	Impenetrável		
	SPT 02A	587,44	0,0 - 0,9	Argila arenosa, avermelhada, com pedregulhos	44,47	5,98
			0,9 - 2,5	Argila arenosa, avermelhada e marrom, com pedregulhos, rija	38,23	3,61
			2,5 - 5,1	Argila arenosa, variegada (marrom e branco) com pedregulhos, média a rija	35,63	4,28
			Abaixo de 5,1	Impenetrável		
	SPT 02B	585,37	0,0 - 1,5	Argila arenosa, avermelhada, com pedregulho, média	40,21	5,01
			1,5 - 2,7	Argila arenosa, variegada (marrom e amarela), com pedregulhos, média	38,00	4,04
			2,7 - 3,8	Argila arenosa, marrom, média	34,55	3,17
			3,8 - 6,8	Argila arenosa, marrom, com pedregulhos, média a rija	35,02	7,51
			6,8 - 11,1	Argila arenosa, variegada (marrom e branco) com pedregulho, rija a dura	36,97	20,15
			Abaixo de 11,1	Impenetrável		
	SPT 03	613,32	0,0 - 0,6	Argila pouco arenosa, avermelhada, com matéria orgânica	35,48	3,26
			0,6 - 2,8	Argila pouco arenosa, avermelhada, com pedregulhos, mole	33,77	4,39
			2,8 - 3,6	Argila arenosa, vermelho escuro, dura	33,77	7,65

	3,6 - 4,9	Argila arenosa, marrom e pouco avermelhada, com pedregulhos, rija	33,75	10,21
	4,9 - 6,5	Argila arenosa, marrom, rija	35,16	15,05
	6,5 - 8,7	Argila arenosa, variegada (amarelo e pouco esverdeado), com pedregulhos, rija a média	34,92	21,89
	8,7 - 13,0	Argila arenosa, marrom com pedregulhos, dura	32,90	21,07
	13,0 - 15,8	Argila arenosa, marrom, com pedregulhos, dura	32,47	26,05
	Abaixo de 15,8	Impenetrável		

Comparando-se os valores obtidos para ângulo de atrito, esta unidade amostral apresentou 32,47° (menor valor). Valores discrepantes podem ser vistos no SPT02 e SPT02A que apresentaram respectivamente 46,05° e 44,47° sendo estes os maiores valores ambos na menor profundidade das amostras, isto deve-se provavelmente a erro de leitura do NSPT ou de análise do operador do equipamento de sondagem, visto que os valores desta unidade amostral variaram entre 30 e 35 graus.

4.1.2.5 Unidade amostral KM 667+710

Da mesma maneira que aconteceu em outras unidades amostrais, esta também possui registro de escorregamento, porem este é o registro mais antigo e ocorreu em novembro de 2008, o fator de deflagração neste caso foi a erosão ocasionada por eventos pluviométricos. Já o solo do local se caracteriza pela presença de aterro, colúvio e solo residual. A Tabela 18 mostra a caracterização desta unidade amostral.

Tabela 17: Caracterização da unidade amostral km 667+710

Unidade amostral	Amostra	Profundidade (m)	Tipo de solo	Ângulo de atrito	Coesão kPa
KM 667+710	SPT 01	0,0 - 0,1	Argila siltosa variegada amarela	28,94	2,31
		0,1 - 0,3	Camada de asfalto	28,94	2,31
		0,3 - 2,9	Areia fina muito siltosa, variegada, fofa	29,72	5,37

		2,9 - 5,0	Areia fina muito siltosa, marrom, de fofa a pouco compacta	30,38	10,22
		5,0 - 7,9	Areia fina siltosa, marrom, pouco compacta	27,73	10,93
		7,9 - 12,8	Argila siltosa pouco arenosa, laranja, mole	25,52	10,72
		12,8 - 16,0	Argila fina muito siltosa, amarela, medianamente compacta	31,39	49,37
		16,0 - 17,45	Areia fina muito siltosa, amarela, compacta	35,48	83,01
		Abaixo de 17,45	Impenetrável		
	SPT 02	0,0 - 2,0	Argila siltosa arenosa, amarela e cinza, muito mole	32,81	5,14
		0,2 - 5,6	Argila siltosa arenosa, amarela e cinza, média a rija	35,06	14,26
		5,6 - 8,45	Argila muito siltosa, amarela, dura	36,99	29,23
		Abaixo de 8,45	Impenetrável		

As profundidades nesta unidade amostral vararam de 8,45 metros (SPT 02) a 17,45 metros (SPT 01). O maior valor de ângulo de atrito é a do SPT 02 que apresentou 36,99°, o solo foi descrito como argila muito siltosa amarela, dura, o que pode justificar o valor. Com relação a coesão, esta unidade amostral apresentou uma das mais altas, SPT 01, como sendo 83,01. Esta diferença entre os demais valores calculados pode ser por conta do tipo de solo, neste caso descrito como areia fina muito siltosa medianamente compacta, não sendo descartada a possibilidade de erro de cálculo.

4.1.2.6 Unidade amostral KM 667+900

A última unidade amostral analisada apresenta solo residual e um registro de escorregamento entre os dias 11 e 13 de março de 2011, a mesma data de ocorrência em outras 4 unidades amostrais. Apesar de o banco de dados não constar relação deste escorregamento com a pluviosidade, os outros eventos ocorreram entre as mesmas datas o que pode ser relacionado. Neste, foram realizados 7 sondagens, a caracterização do local é apresentado na Tabela 19.

Tabela 18: Caracterização da unidade amostral km 667+900

Unidade amostral	Amostra	Profundidade (m)	Tipo de solo	Ângulo de atrito	Coesão kPa
KM667+900	SPT 02	0,0 - 2,3	Argila com areia média, marrom e amarela, muito mole e mole	28,61	1,99
		2,3 - 3,0	Argila com areia média, branca e amarela, mole	35,50	11,66
		3,0 - 13,18	Argila com areia média e pedregulhos, variegada, média a dura	35,17	32,04
		Abaixo de 13,18	Impenetrável		
	SPT 03	0,0 - 0,2	Camada vegetal	27,20	0,08
		0,2 - 4,9	Argila com areia média, marrom e amarela, muito mole e mole	28,96	3,63
		4,9 - 12,0	Argila com areia média, variegada, rija a dura	34,40	27,99
		12,0 - 15,7	Argila com areia média, com pedregulhos, variegada, rija e dura	36,61	57,18
		Abaixo de 15,7	Impenetrável		
	SPT 04	0,0 - 1,0	Argila com areia média, variegada	30,94	0,81
		1,0 - 5,0	Argila com areia média, marrom e amarela, mole e média	30,54	1,71
		5,0 - 8,0	Argila com areia média, variegada, mole a rija	34,53	17,79
		8,0 - 13,0	Argila com areia média e pedregulhos, variegada, dura	37,06	36,47
		13,0 - 20,0	Argila siltosa, branca e amarela, rija e dura	34,19	36,62
		Abaixo de 20,0	Limite de sondagem		
	SPT 05	0,0 - 0,2	Camada vegetal	34,13	2,22
		0,2 - 1,5	Argila com areia média, marrom, mole	31,67	1,20
		1,5 - 7,0	Argila com areia média, marrom e amarela, mole e média (dura aos 4 metros)	32,95	7,65
		7,0 - 13,7	Argila com areia média, variegada, rija e dura	36,09	32,63
		13,7 - 20,0	Argila siltosa, branca e amarela, rija e dura	34,91	40,78
		Abaixo de 20,0	Limite de sondagem		
	SPT 06	0,0 - 0,2	Camada vegetal	28,94	1,56
		0,2 - 8,5	Argila com areia média, marrom e amarela, muito mole à rija	29,35	9,79
		8,5 - 15,0	Argila com areia média, variegada, rija e dura	34,83	48,95
		15,0 - 20,0	Argila siltosa, marrom e amarela, dura	36,76	85,61
		Abaixo de 20,0	Impenetrável		
	SPT 07	0,0 - 0,8	Argila com areia média, marrom	32,64	1,55
		0,8 - 7,5	Argila com areia média, marrom e amarela, mole à rija	33,55	10,70

		7,5 - 17,0	Argila com areia média, variegada, rija e dura	35,16	33,78
		17,0 - 20,0	Silte com areia média, branca, dura	40,28	94,87
		Abaixo de 20,0	Limite de sondagem		
	SPT 08	0,0 - 2,2	Argila siltosa com areia média, marrom, mole	31,63	2,66
		2,2 - 10,8	Argila com areia média, marrom e amarela, mole à rija	31,31	13,14
		10,8 - 18,7	Argila com areia média, variegada, rija e dura	34,15	44,39
		18,7 - 20,0	Argila siltosa, branca, dura	33,63	51,78
		Abaixo de 20,0	Limite de sondagem		

Esta é a unidade amostral que apresentou a maior profundidade, dos 7 pontos amostrais, a menor profundidade foi de 13,18 metros no SPT 02 (não possui SPT 01) e o limite neste caso foi de 20 metros em 5 pontos (SPT 04, SPT 05, SPT 06, SPT 07 e SPT 08).

4.1.3 Caracterização geral das unidades amostrais de SPT

Após a obtenção dos valores de profundidade, ângulo de atrito e coesão obtidos em cada ponto amostral, foi calculado também a média destes valores por unidade amostral. A média dos parâmetros possibilita uma avaliação generalizada da área. As médias por unidade amostral da profundidade encontrada estão apresentadas na Figura 14.

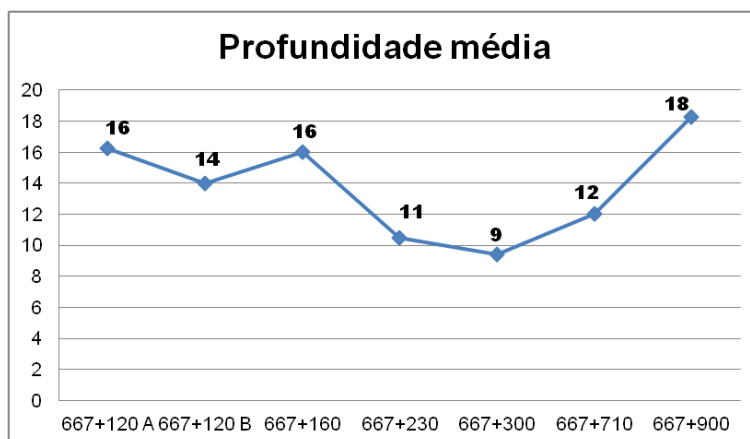


Figura 14: Profundidade média

Pode-se observar que das 7 unidades amostrais, a menor profundidade média é a do km 667+300 com 9 metros e a maior foi a do km 667+900 que foi de 18 metros, três delas variaram entre 14 e 16 metros de profundidade (km 667+120A e B e km 667+160).

Com relação ao ângulo de atrito interno, a Figura 15 apresenta os resultados obtidos.

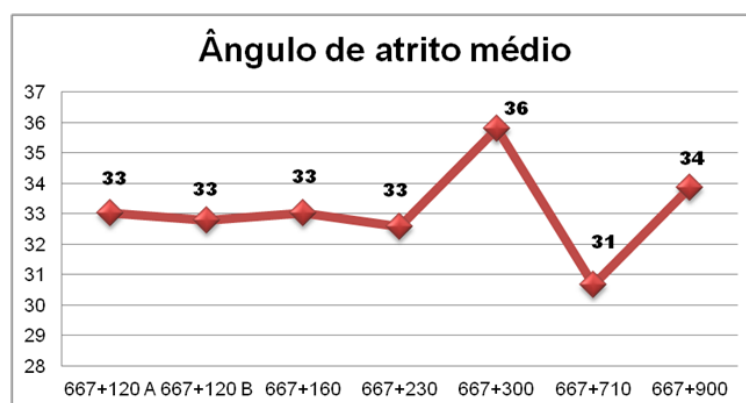


Figura 15: Ângulo de atrito médio das unidades amostrais

Percebe-se uma grande variação com relação ao ângulo de atrito interno, principalmente entre o km 667+300 e km 667+710, que varia de 36 a 31° respectivamente, os demais pontos amostrais possuem valores entre 31 e 34°.

Já a Figura 16 mostra os valores encontrados para a coesão média dos pontos amostrais.

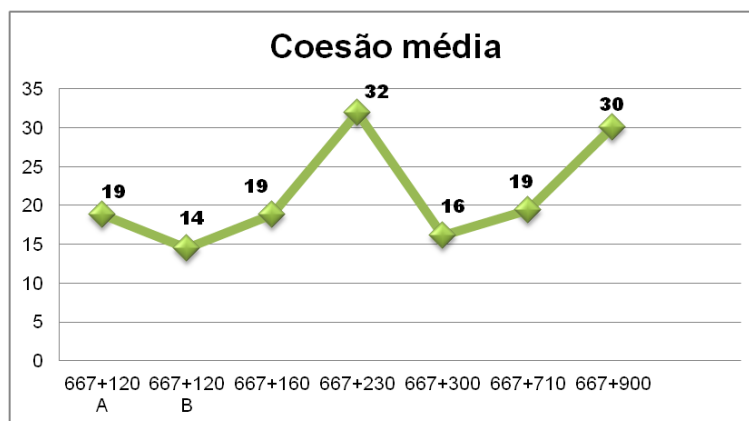


Figura 16: Valores obtidos para coesão.

O menor valor encontrado para coesão foi no km 667+160 que foi de 14 kPa, já nos km 667+230 e 667+900 os valores foram os maiores valores encontrados, 32 e 30 kPa respectivamente.

Análises estatísticas foram aplicadas aos valores médios para cada unidade amostral buscando-se uma correlação entre os valores obtidos para ângulo de atrito e coesão. Como mostra a Figura 17.

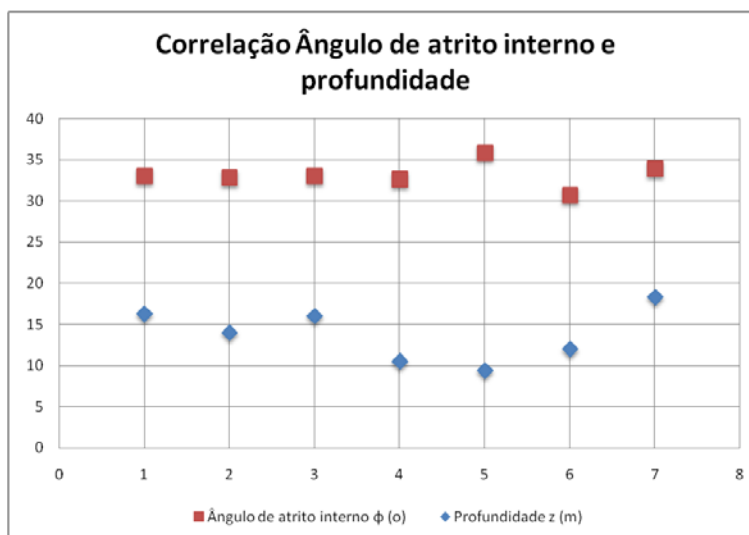


Figura 17: Correlação entre ângulo de atrito interno e profundidade.

As tendências verificadas nas tabelas de caracterização das unidades amostrais são confirmadas por meio da correlação apresentada na Figura 16, tanto nas tabelas quanto no gráfico é possível observar que ambos dados variam sem que haja alguma relação, sendo bastante claro entre os pontos 4 e 6 (eixo das coordenadas). Já a correlação entre a profundidade e a coesão é apresentada na Figura 17, a seguir.

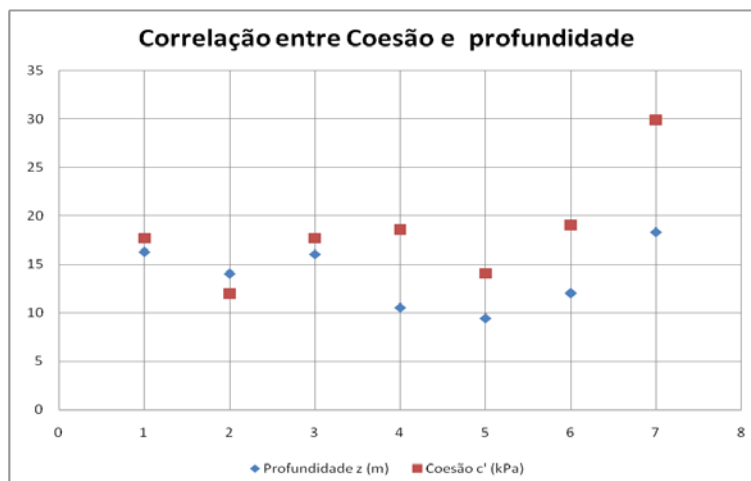


Figura 18: Correlação entre Coesão e profundidade.

Nesta Figura 17 é possível perceber a forte correlação entre os valores de coesão e profundidade, com exceção do ponto 4 (eixo das coordenadas) que pode ser considerado um erro amostral, nos demais pontos os valores de coesão aumentam de acordo com o incremento da profundidade. Esta correlação também pode ser observada nas tabelas de caracterização das unidades amostrais.

Para que seja descartada a hipótese de erro amostral que aparece nos dois gráficos de correlação, os cálculos serão revisados, o que mostrará se trata-se ou não de erro amostral.

De qualquer modo, pode-se afirmar que os gráficos de dispersão apontam para as mesmas tendências observadas nas tabelas de caracterização.

4.1.4 Análise granulométrica das amostras deformadas

Durante as coletas de amostras indeformadas também foram coletadas amostras deformadas para realização de ensaios granulométricos. Estes seguiram o roteiro descrito na NBR 6502:1995 (ABNT, 1995).

Os resultados obtidos nos ensaios granulométricos, bem como a classificação segundo NBR 6502:1995, conforme apresentado na Tabela 19, a seguir.

Tabela 19: Caracterização granulométrica, amostras deformadas.

Amostra	Argila <0.002mm	Silte 0.002- 0.06mm	Areia Fina 0.06- 0.2 mm	Areia Média 0.2 - 0.6 mm	Areia Grossa 0.6 - 2 mm	Pedregulho 2 - 60 mm	Classificação ABNT 6502/95
AI-05A	3,14	43,76	10,70	17,24	9,46	15,69	Silte Arenoso
AI-12	2,28	48,72	10,14	14,40	10,43	14,03	Silte Arenoso
AI-13	30,69	48,77	11,39	7,11	1,93	0,11	Silte Argiloso
AI-13A	4,13	56,41	9,20	16,75	8,94	4,56	Silte Arenoso
AI-14	10,52	54,26	9,38	17,18	8,54	0,13	Silte Arenoso

Dentre as cinco amostras, apenas a amostra AI13 foi classificada como Silte Argiloso, todas as demais foram classificadas como Silte Arenoso.

4.1.5 Amostras indeformadas

Na segunda campanha de campo, que ocorreu entre os dias 11 e 20 de novembro foram confirmados os pontos de coleta determinados na primeira campanha realizada em setembro de 2013. Alguns pontos foram relocados, sendo eleitos 15 pontos de coleta de amostras indeformadas, das quais, 4 estão na área de estudo.

Após a coleta as amostras foram transportadas para o Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME). Em nenhum dos locais de coleta foi observado instabilidade das paredes durante a escavação.

Já a localização e o solo do local de coleta (solo descrito durante visitas ao sítio de estudo) estão dispostos na Tabela 20.

Tabela 20: Localização e caracterização dos pontos de coleta de amostra indeformada.

Amostra	Origem do solo	Prof. base do bloco (m)	Data da coleta	km	Pista	Lado	Cota (m)	Coordenada	
								E	S
AI-05A	Aterro	1,40	19/11/2013	-	-	-	553	0706898	7137808
AI-12	Aterro	1,20	18/11/2013	669	N	LD	507	0706896	7136787

AI-13	Colúvio	1,50	19/11/2013	668	N	LD	582	0706740	7138096
AI-13A	Residual Migmatito	1,00	19/11/2013	668	N	LD	601	0706721	7138133
AI-14	Residual Granito	1,30	20/11/2013	667	N	LD	618	0706474	7138248

Os ensaios de laboratório foram iniciados no dia 16 de janeiro dia de 2014 e se estenderam até dia 18 de fevereiro de 2014. Para a realização dos ensaios de cisalhamento direto, fui instruída pelos responsáveis do LAME e acompanhada pelos técnicos do laboratório.

Após a determinação do tipo de ensaio, onde foi definido que os ensaios realizados nas amostras da área de estudo seriam o ensaio de cisalhamento direto drenado.

As amostras AI-12 e AI-13 foram as primeiras a serem ensaiadas, e após uma reunião com a diretoria da Concessionária, constatou-se, pela experiência do engenheiro responsável, que maior parte dos deslizamentos na região ocorre em tensões menores que as utilizadas usualmente nos ensaios de cisalhamento direto, por este motivo decidiu-se que os ensaios teriam tensões menores (90; 60; e 30 kPa), sendo que o valor de 120 kPa utilizado nestas duas amostras iniciais é o valor padrão do laboratório.

Os blocos correspondentes foram abertos para moldagem dos corpos de prova em anéis metálicos quadrados com largura média aproximada de 100 mm e altura média aproximada de 20 mm, conforme mostra a Figura 19.



Após a moldagem dos anéis foram retificados para que o solo no interior do anel tivesse altura o mais próximo possível da altura dos anéis. Os corpos de prova que não foram transferidos para a caixa de cisalhamento foram embalados em papel filme para que não perder a umidade natural. O corpo de prova a ser ensaiado foi transferido para a caixa de cisalhamento.

A primeira parte do ensaio consiste no adensamento, após a colocação da caixa de cisalhamento, o espaço vazio é preenchido com água. O carregamento é feito através da colocação de pesos relativos às tensões que serão utilizadas no ensaio, sendo as tensões utilizadas estão dispostas na Tabela 21.

Tabela 21: Amostras, tipo de ensaio, tensões e carregamento.

Amostra	Ensaio	Tensões (kPa)	Carregamento em kg (respectivo)
AI-05A	Cisalhamento direto	30; 60; 90	3; 6; 9
AI-12		30; 60; 120	3; 6; 12
AI-13		30; 60; 120	3; 6; 12
AI-13A		30; 60; 90	3; 6; 9
AI-14		30; 60; 90	3; 6; 9

A Figura 20 mostra o equipamento utilizado para realização dos ensaios e o detalhe da caixa de cisalhamento.

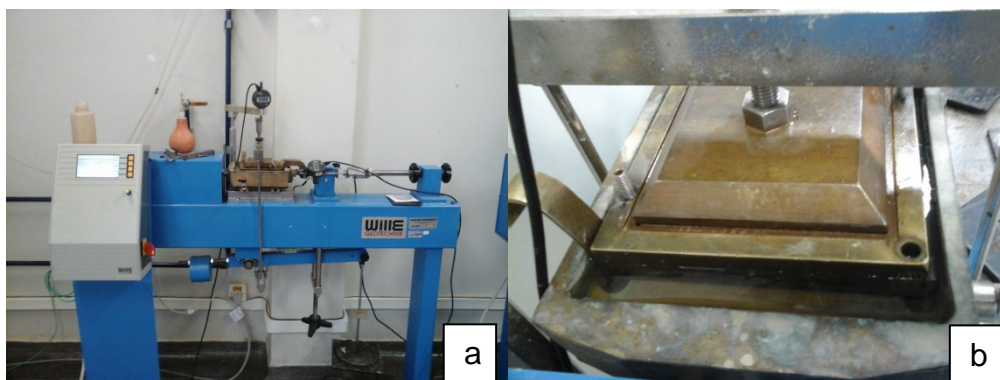


Figura 20: (a) Equipamento de ensaio de cisalhamento direto; (b) Detalhe da caixa de cisalhamento.

O adensamento foi realizado geralmente com mais de doze horas já que o ensaio era montado no início da tarde e o equipamento fazia a leitura até as primeiras horas da manhã seguinte. Nesta etapa o equipamento faz leituras do deslocamento vertical devido ao carregamento.

Já a segunda etapa do ensaio é o cisalhamento, que consiste no início das leituras de deslocamento horizontal, sendo utilizada em todas as amostras a velocidade de 0,007mm/min. Esta etapa do ensaio, em geral durou cerca de 6 horas.

O software de leitura do deslocamento horizontal foi programado para realizar leituras a cada minuto.

Após a finalização do ensaio, em algumas amostras foi possível observar o rompimento do corpo de prova, isto não foi possível em todas as amostras devido a variação granulométrica dos solos ensaiados, isto se deu provavelmente por conta do fato que o ensaio drenado, porém o local onde é colocada a caixa de cisalhamento é mantida cheia de água durante todo o ensaio, em algumas amostras não foi possível perceber o rompimento tão claro quanto se vê na Figura 21, abaixo.



Figura 21: Corpo de prova rompido após o ensaio.

Os resultados obtidos para ângulo de atrito e coesão estão dispostos na Tabela 22.

Tabela 22: Resultados para Ângulo de atrito e coesão – ensaio de cisalhamento direto.

Amostra	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
AI - 05A	37,77	3,87
AI - 12	32,4	6,42
AI -13	34,14	3,07
AI -13A	37	2,9
AI - 14	28,9	14,6

O procedimento de comparação entre os dois métodos (SPT e cisalhamento direto) levou em consideração o tipo de solo e a localização das amostras, o que resultou na utilização de 4 unidades amostrais do SPT e 4 amostras indeformadas. As três unidades amostrais do SPT não foram utilizadas na comparação, visto que não foi possível determinar a proximidade destas com as amostras indeformadas, pois nem todos os boletins de sondagem possuíam coordenadas. Por este motivo foram utilizadas somente as unidades amostrais nomeadas entre o km 667 e 668.

Então os pontos de coleta de amostra indeformada e as unidades amostrais mais próximas que apresentaram o mesmo tipo de solo, foram selecionadas para comparação de resultados. Como os resultados do cálculo baseado no SPT são dados por profundidade, para tanto os valores selecionados levaram em consideração a profundidade da coleta do bloco de solo, da mesma maneira os valores obtidos para ângulo de atrito e coesão também foram selecionados de acordo com a mesma profundidade.

Após determinar quais amostras eram compatíveis para comparação, elaborou-se a Tabela 23, que apresenta valores de ângulo de atrito e coesão para locais com mesmo tipo de solo próximas (TABELA 23).

Tabela 23: Comparação de valores: calculados por SPT; ensaio de cisalhamento direto; BORCHARDT (2005) e KOZCIAK (2005).

Área de estudo									
Amostra indeformada	Solo	Prof. (m)	ϕ (°)	C (kPa)	Unidade amostral SPT	Solo	Prof. média (m)	Média do ϕ (°)	Média da C (kPa)
AI-05A	Aterro	1,4	37,77	3,87	667+710	Aterro/colúvio	2	32,39	9,81
AI-12	Aterro	1,2	32,4	6,42	Não houve coleta de amostra indeformada na proximidade				
AI-13	Colúvio	1,5	34,14	3,07	667+120	Colúvio	1,76	31,69	3,22
AI-13A	Residual de migmatito	1,5	37	2,9	667+900	Solo residual	2,1	30,61	4,52
AI-14	Residual de granito	1,0	28,9	14,6	667+160	Solo residual	1,26	31,09	2,87

Percebe-se que os valores obtidos para ângulo de atrito obtidos por meio do cálculo são pouco menores que os valores que resultaram do ensaio de cisalhamento direto, o que segundo FIORI (*op. cit.*) influencia nos cálculos do fator de segurança de maneira positiva, uma vez que quanto menor for o ângulo de atrito maior será a margem de segurança obtida através do cálculo do FS. Com base nos valores apresentados na Tabela 23, o valor médio para ângulo de atrito obtido por meio do cisalhamento direto é de 34,02° e o valor médio obtido pelo cálculo baseado no SPT é de 31,44°.

Com relação à coesão, tanto no presente estudo quanto nas pesquisas de BORCHARDT (2005) e KOZCIAK (2005), os valores apresentaram variação, tanto para o valor calculado quanto para o obtido no ensaio de cisalhamento direto. No caso da presente pesquisa, o valor médio da coesão obtido pelo cálculo baseado no SPT é de 5,1 kPa e o valor médio resultante do cisalhamento direto é de 6,17kPa.

FERREIRA (2013) fez sua pesquisa em Cubatão-SP, bem como no presente estudo, os valores de ângulo de atrito e coesão foram obtidos por meio de ensaio de cisalhamento direto. Os solos estudados foram classificados pela textura,

de franca, franco arenoso, franco argiloso e franco siltoso. Os valores de ângulo de atrito variaram entre $29,1^\circ$ a $36,7^\circ$, sendo estes valores muito próximos aos encontrados na presente pesquisa. O mesmo acontece com o valores referentes a coesão, a autora encontrou valores entre 0 e 11,05 kPa, a diferença com a presente pesquisa é que o menor valor encontrado para coesão foi de 2,87 kPa, o que pode indicar que os solos estudados não possuem percentual de areia tão grande quanto o estudado em Cubatão.

Ainda com relação ao trabalho de FERREIRA (2013) são citados valores dos trabalhos de autores que realizaram suas pesquisas em 1994, nas quais, Wolle e Carvalho encontraram valores muito próximos para solos areno-argilosos e arenosos, sendo o ângulo de atrito, das camadas superficiais menor que 34° , tendo a coesão variado entre 1 e 4 kPa.

Outro trabalho que pode ser acrescentado a discussão é o de Amaral Junior (2007), no qual, os valores obtidos para coesão variaram de 1 a 9 kPa e o ângulo de atrito de 32° a 42° , sendo que este último trabalho também foi realizado na Serra do Mar, na região de Costa Verde no estado do Rio de Janeiro.

Pode-se que dizer os dados apresentados tanto na pesquisa de FERREIRA (2013) quanto dos demais autores utilizados pela autora também estão muito próximos dos valores encontrados na presente pesquisa, a não ser pelo valor mais alto para ângulo de atrito, de 45° , que encontrou Amaral Junior (2007).

Em um trabalho de modelagem para gestão de áreas susceptíveis a escorregamentos elaborado para a região de Vitória-ES, SILVA *et. al.*, (2013) utilizou uma faixa de valores para ângulo de atrito e coesão para obtenção de mapas em diversos cenários. Sendo utilizados os seguintes valores: ângulo de atrito 25° , 30° , 35° , 40° e 45° ; e coesão 0, 2, 4, 6 e 8 kPa. Tanto por meio do cálculo pelo SPT quanto pelo ensaio de cisalhamento direto realizado para a área de estudo da presente pesquisa também estão dentro da mesma faixa.

4.1.6 Mapas obtidos por modelagem

A base cartográfica utilizada no presente estudo apresenta curvas de nível de 10 em 10 metros, sistemas de coordenadas UTM Sirgas 2000. A Figura 22 apresenta o Mapa Planialtimétrico.

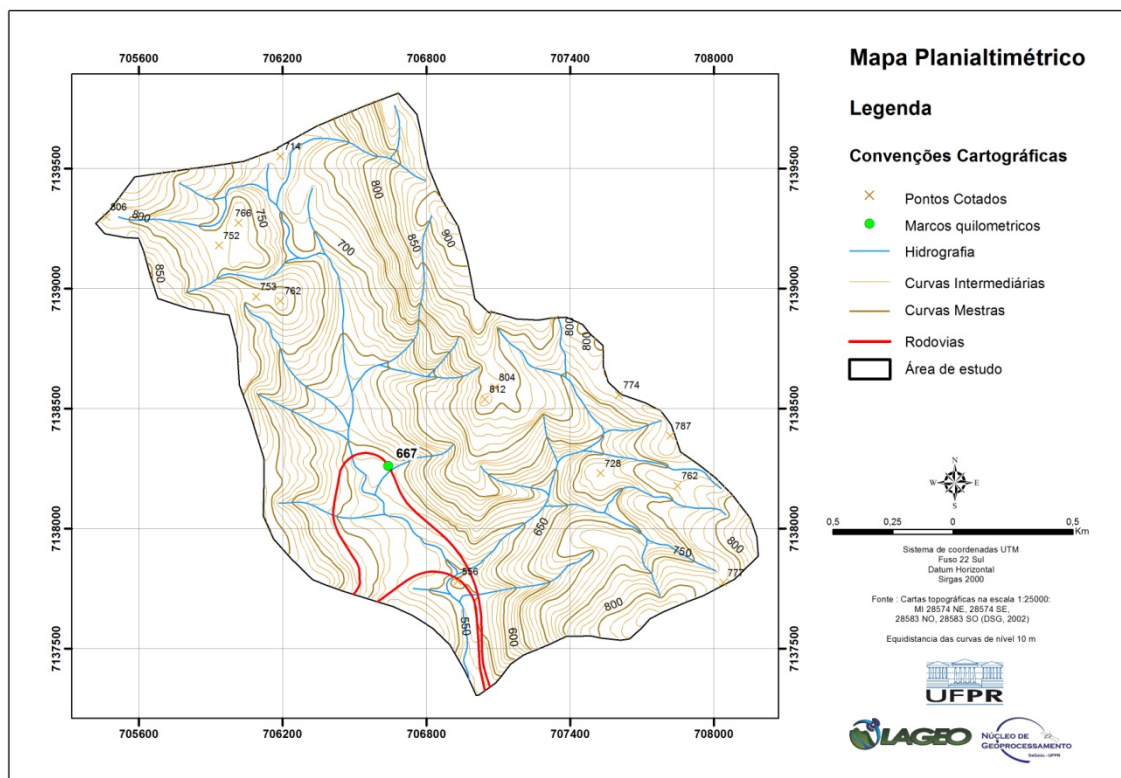


Figura 22: Mapa planialtimétrico.

Pode-se observar na área de estudo a presença de dois cursos de água principais e seus afluentes, ao norte da rodovia, estes fazem parte da sub-bacia do rio São João.

A aplicação de dados topográficos em ambiente SIG no ArCGis versão 10.1, possibilitou a obtenção do mapa de declividade, utilizando-se: área delimitada da sub-bacia, pontos cotados, curvas de nível e hidrografia, todos em formato shape file. A ferramenta Top to Raster, combina estas informações em um novo Shape file que foi denominado Mapa de Declividade (Figura 23). Após a obtenção da declividade foi realizada uma divisão em classes de declividade está conforme orientado pela EMBRAPA (2006) e descrita por SILVEIRA (2010). As 6 classes

estão apresentadas em percentual divididas em: 0-8%; 8-20%; 20-30%; 30-40%; 40-45% e maior que 45%.

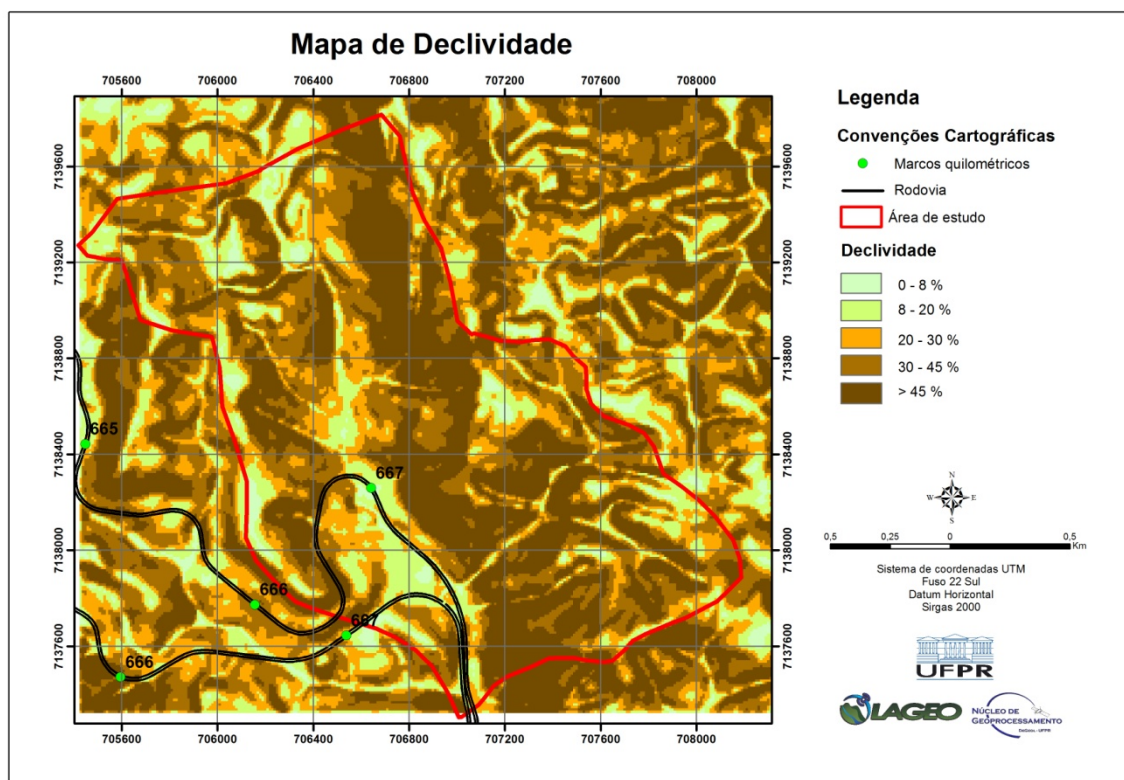


Figura 23: Mapa de declividade

O mapa de declividade e o gráfico da Figura 23 mostram que a área apresenta, em maior parte de sua área total (51,5%), declividades entre 20 e 40% (relevo forte ondulado). Áreas com declividades entre 8 e 20% (relevo ondulado), representam 15,69% e predominam entre as pistas norte e sul da rodovia e em algumas áreas mais elevadas, os locais marcados por áreas que com declividade menor que 8%, ou seja relevo plano ou relevo suave ondulado são as menores áreas e mais comumente encontradas nos topos das vertentes, estas correspondem a 7,17% da área de estudo (FIGURA 25). O tipo de relevo da área foi definida com base na publicação da EMBRAPA (2006) e na pesquisa de SILVEIRA (2010).

No Mapa Hipsométrico (Figura 24) é possível ver a tendência do fluxo da água superficial que converge para a rodovia, indicado pelas setas.

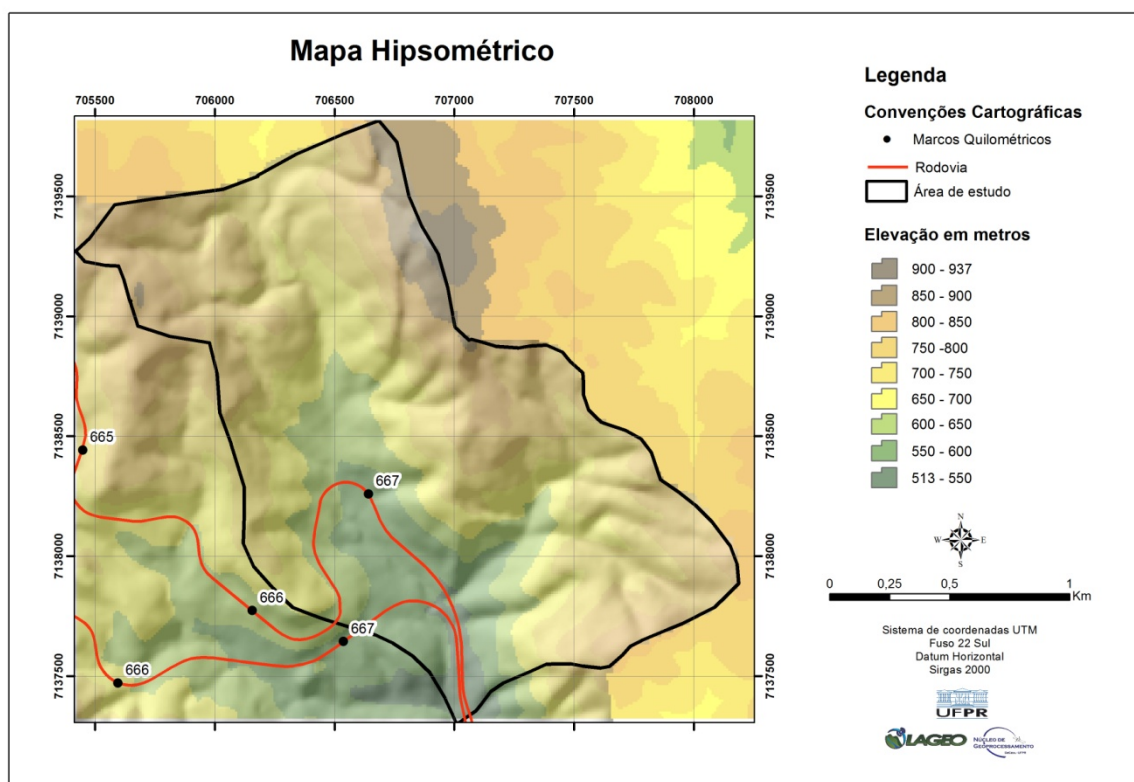


Figura 24: Mapa hipsométrico.

A área de contribuição da sub-bacia hidrográfica converge em direção a rodovia, tal fato é possível de ser observado levando-se em conta a coloração do mapa, as áreas em amarelo representam as maiores altitudes e as áreas em verde as menores, é possível observar a área de convergência demarcada pelas setas.

Utilizar uma bacia hidrográfica, ou uma sub-bacia, como no caso do presente estudo é de acordo com VIEIRA (2007) bastante útil, uma vez que considerar áreas de contribuição que representa a área de captação da água da chuva, demonstra a relação direta entre a forma da vertente e os processos hidrológicos, possuindo por tanto, papel relevante na análise da susceptibilidade, especialmente se combinadas com outras variáveis como declividade e propriedades físicas do solo.

A convergência tem influência direta no comportamento do solo da área adjacente à rodovia, e consequentemente afeta diretamente na ocorrência dos escorregamentos. A importância de se conhecer o solo é destacada por ORTIGÃO (2007), pois o uso e a ocupação do solo tende a comprimí-lo o que provoca

deformações por meio da compressão, conseqüentemente pode cisalhá-lo o que culmina na ruptura.

A Figura 25 mostra o mapa de solos obtido através da modelagem e mostra os cinco principais tipos de solos encontrados na área de estudo e redondezas.

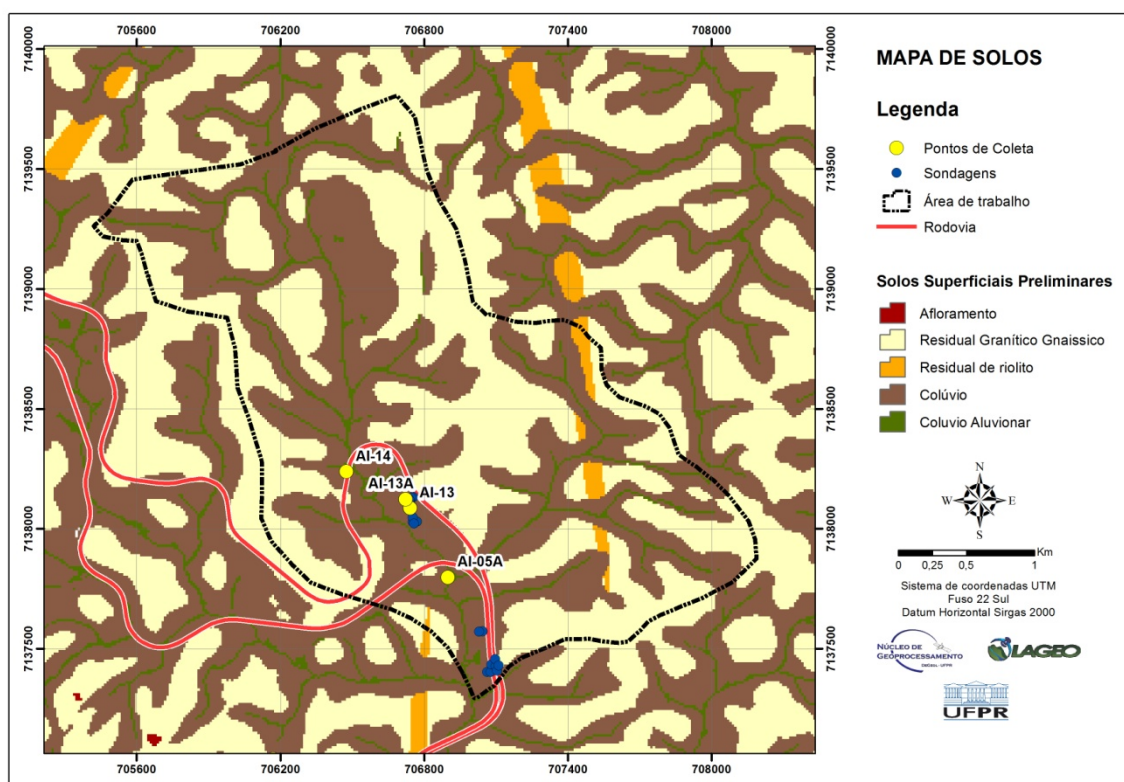


Figura 25: Mapa de solos e pontos de coleta de amostras indeformadas e pontos de SPT.

Alguns dos pontos de sondagem SPT (que possuíam coordenadas) estão espacializados no mapa preliminar de solos da área de estudo. Neste mapa é possível observar o predomínio de solos Residuais Granítico Gnaissico e Colúvio, principalmente no local onde está a rodovia. Nos estudos de campo e laboratório foram caracterizados também solos Residuais de outras litologias, este último especialmente com relação ao solo Residual Granítico Migmatítico, isto se deve ao fato de uma possível cobertura dos solos residuais pelos colúvios.

4.1.6.1 Mapa de Fator de Segurança

Para a obtenção de um Mapa de Fator de segurança é necessário aplicar técnicas de SIGs para espacialização das equações do FS, e conforme SILVEIRA *et. al.*, (2012) esta técnica já foi utilizada por vários autores desde 1995, o autor discorre sobre algumas rotinas computacionais customizadas, como o caso do SHALSTAB e SINMAP para aplicação da equação do FS, sendo que esta customização facilita a aplicação uma vez que todas as fases do processamento já estão resolvidas, porém o emprego de equação em SIG sem o uso destas rotinas pré-determinadas permite que o pesquisador possa trabalhar com mais liberdade quanto a escolha das variáveis consideradas no FS.

Para determinar o FS, foi utilizada a proposta apresentada por FIORI e CARMIGNANI (2009), que é um método determinístico baseado no conceito de equilíbrio-limite.

Os valores utilizados na fórmula (coesão, ângulo de atrito e espessura do solo) do FS foram os valores obtidos por meio do cálculo baseado nas sondagens SPT, os valores ângulo de atrito e coesão foram menores dos que foram encontrados no ensaio de cisalhamento direto. Já o valor utilizado referente ao peso específico do solo natural foi baseado na pesquisa de Borchardt (2005) e Kozciak (2005), como mostra a Tabela 24.

Tabela 24: Valores utilizados para obtenção do Mapa do Fator de Segurança.

Tipo de solo	Ângulo de atrito (°)	Coesão (c')	Gama nat (γ_{nat})*	Espessura (m)	Localização: km / amostra indeformada
Residual granítico-gnaiss	31,09	2,87	18	16	Km 667+160 / AI-14
Residual outras litologias (migmatito)	30,61	4,52	18	17,57	Km 667+900 / AI13A
Coluvio	31,69	3,22	18	15,33	Km 667+120 / AI-13

*Valores apresentados por Borchardt (2005) e Kozciak (2005).

Então, com base no mapa de solos e nos valores de ângulo de atrito (°), coesão (c'), peso específico do solo natural (γ_{nat}), e espessura (m), estes dados foram combinados no software ArcGis® versão 10.1 (ESRI, 2011), foi possível obter o mapa do FS.

Os valores apresentados na Tabela 25 foram extrapolados para toda área da sub-bacia seguindo a distribuição dos tipos de solos encontrados, então com base no mapa de solos e do equacionamento dos dados apresentados foram então aplicados a Equação 10 para determinar o Fator de Segurança no ambiente do software ArcGis®, tendo como resultado o mapa preliminar de Susceptibilidade.

O resultado obtido pela aplicação da equação do FS de segurança é qualitativo e neste caso foi dividido em quatro classes, sendo áreas de muito alta susceptibilidade a escorregamentos correspondem a resultados menores que 1,25. A área classificada como alta susceptibilidade apresentam valores entre 1,25 e 1,5, e a classe moderada susceptibilidade compreende resultados entre 1,5 e 2,0, já as áreas de baixa susceptibilidade tem valores maiores que 2,0. Como mostra a Figura 26.

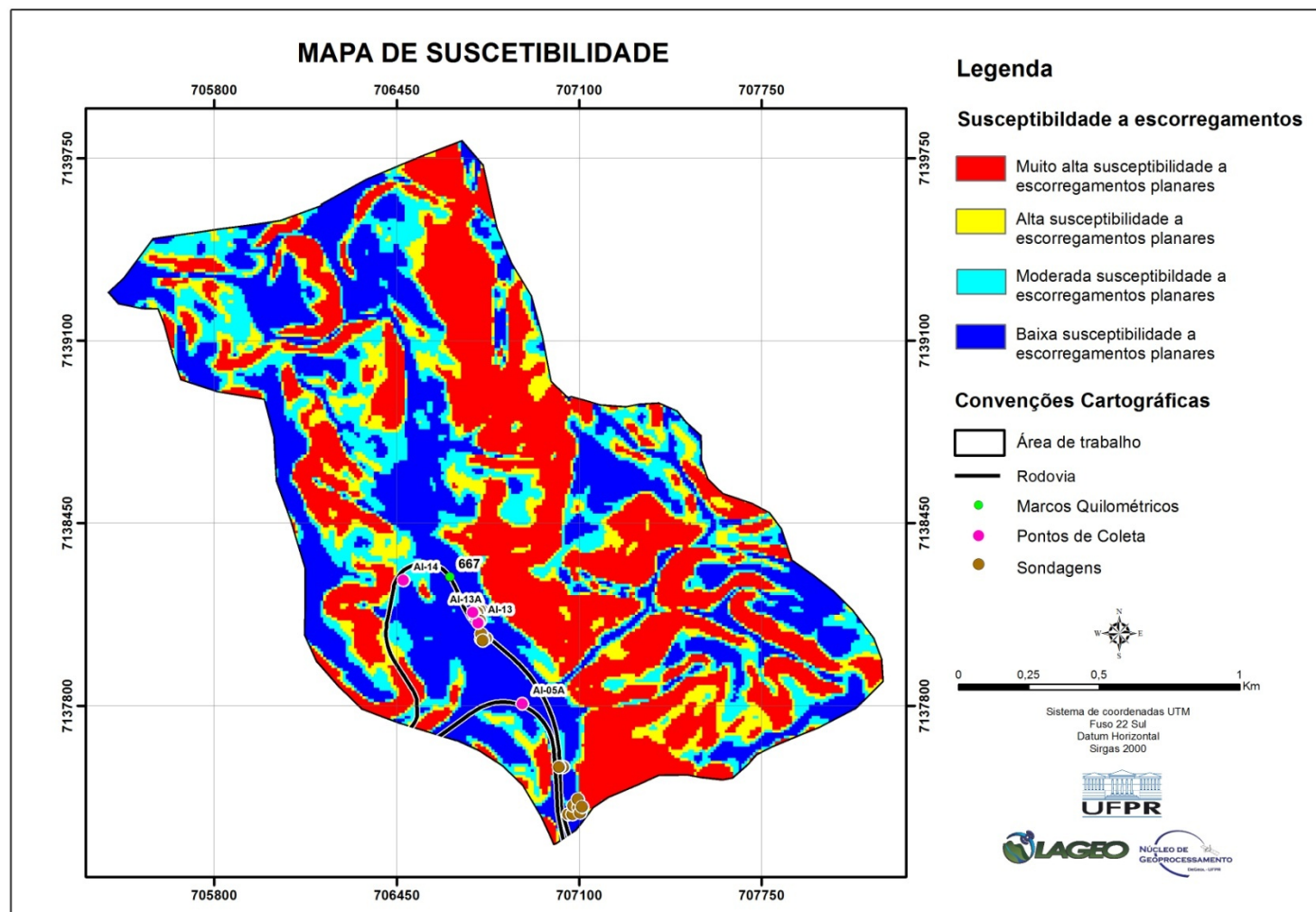


Figura 26: Mapa de susceptibilidade da sub-bacia estudada.

Neste último mapa pode-se perceber que a maior parte da área, principalmente a área localizada ao norte da rodovia foi classificada com área de muito alta susceptibilidade aos escorregamentos.

O mapa expressa a espacialização dos valores obtidos na fórmula do FS e depois são diretamente relacionados a valores qualitativos pois expressam o grau de segurança de cada área representada.

Para melhor visualização dos percentuais de cada faixa de susceptibilidade, os valores de cada área estão dispostos na Tabela 25.

Tabela 25: Área e percentual de classes de susceptibilidade a escorregamento.

Classes de suscetibilidade	Valor	Área (m²)	Percentual (%)
Muito alta suscetibilidade	<1,25	1.189.700	36,7
Alta suscetibilidade	1,25-1,50	452.300	14,0
Moderada suscetibilidade	1,5-2,00	595.300	18,4
Baixa suscetibilidade	>2,00	1.000.800	30,9
Área total		3.238.100	

Com base no exposto na Tabela 26, da área de estudo, 50,7% da área estudada foi classificada como Muito alta e alta susceptibilidade, sendo que a maior concentração desta classe está a norte da rodovia (Figura 28), como base nestas informações é possível perceber que a área da sub-bacia convergente a rodovia influencia diretamente na segurança da mesma. Os registros de escorregamentos e obras realizados pela concessionária que administra a rodovia, mostram que esta é uma área bastante problemática.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa bibliográfica mostrou uma lacuna científica com relação a obtenção de valores de ângulo de atrito e coesão através dos cálculos baseados em sondagens SPT em áreas similares, além de não haver comparações de valores obtidos por esta metodologia e por ensaio de cisalhamento direto.

A obtenção dos diversos mapas apresentados no presente trabalho possibilitou uma caracterização da área por diversos métodos, e mostrou que a forma e o relevo influenciam diretamente na estabilidade das vertentes.

O Mapa Planialtimétrico (FIG. 22) possibilitou a visualização da sub-bacia do Rio São João, onde é evidente a existência de dois cursos principais e seus afluentes. A partir deste, foi gerado o Mapa de Declividade (FIG. 23), onde as classes de declividade mostram que 51,5% (maior parte da área de estudo), foi classificado como relevo forte ondulado, conforme classificação da EMBRAPA (2006). Já o terceiro mapa obtido foi o Mapa Hipsométrico (FIG. 24) e é onde ficou evidente a influência do tipo do relevo e sua relação com a hidrografia da área, uma vez que é possível ver a convergência do fluxo de água para a rodovia. O Mapa de Solos (FIGURA 25) possibilitou determinar quais amostras possuíam o mesmo tipo de solo e características de relevo e localização mais similares.

Os valores referentes ao Ensaio de Cisalhamento Direto variaram entre $28,9^\circ$ e $37,77^\circ$ para o ângulo de atrito e entre 2,9 e 14,6 kPa para coesão. Já os valores calculados com base no SPT variaram entre $30,61^\circ$ e $32,39^\circ$ para o ângulo de atrito interno, enquanto para a coesão, os dados variaram entre 2,87 e 9,08 kPa. A menor variação está entre os valores obtidos pelo cálculo para ângulo de atrito baseado no SPT, além do fato que na média o valor também é menor. Por este motivo os valores utilizados no cálculo do FS foram baseados nos valores obtidos pelo segundo método descrito (ângulo de atrito, coesão e profundidade).

O mapa de Susceptibilidade a escorregamentos mostrou que metade da área de estudo (50,7%) foi classificada como área de muito alta e alta susceptibilidade a escorregamentos. Para o cálculo do FS a área foi dividida em quatro classes de susceptibilidade, Muito Alta Susceptibilidade para áreas com valor menor que 1,25, Alta Susceptibilidade para áreas com valores entre 1,25 e 1,5, Média Susceptibilidade para áreas entre 1,5 e 2,0, e finalmente áreas com valores

de FS maiores que 2, classificada como Baixa Susceptibilidade. A área ao norte e nordeste da rodovia são as que apresentaram maior ocorrência de áreas classificadas como Muito Alta e Alta Susceptibilidade.

Conforme apresentado, pode-se dizer que o cálculo realizado para obtenção de valores relativos à ângulo de atrito e coesão que foram baseados nos valores constantes em boletins de sondagem SPT são satisfatórios para aplicação em mapas de susceptibilidade. Visto que mesmo sendo menores que os valores resultantes de ensaios de cisalhamento direto, os valores podem ser utilizados sem prejuízo ao resultado final obtido.

A obtenção dos valores, principalmente ângulo de atrito e coesão por meio do ensaio de cisalhamento direto mostrou-se dispendioso com relação ao investimento necessário (coleta e ensaio laboratorial) e ao tempo necessário para a obtenção dos resultados. Além de dispendioso o ensaio de cisalhamento direto representa o comportamento do solo em pequena escala. Como é necessário à utilização de tecnologia avançada, o software e o equipamento utilizado no ensaio também podem exercer influências negativas, gerando resultados que podem não condizer com a realidade.

Considerando-se que as sondagens SPT representam uma das investigações mais difundidas e utilizadas no Brasil, a base de dados que pode ser utilizada para obtenção de mapas de susceptibilidade a escorregamentos pode ser ampliada de maneira extensiva. Além disso, é possível reduzir custos com os estudos de instabilidade de vertentes por meio da utilização de uma grande quantidade de informação já disponível, podendo ser aplicado em áreas que ainda não possuem estudos de estabilidade, mas que carecem deste tipo de pesquisa.

De qualquer modo, pesquisas futuras devem ser realizadas, nos mais diversos tipos de solo, para que o método possa ser difundido e aplicado com o menor custo. Isto poderá possibilitar o uso de pesquisas como instrumento de gestão, verdadeiramente, como um trabalho de prevenção e não somente de remediação dos locais afetados por movimentos de massa.

Referências bibliográficas

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484 - EXECUÇÃO DE SONDAGENS DE SIMPLES RECONHECIMENTO DOS SOLOS.** Rio de Janeiro, 2001.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604 - ABERTURA DE POÇO E TRINCHEIRA DE INSPEÇÃO EM SOLO, COM RETIRADA DE AMOSTRAS DEFORMADAS E INDEFORMADAS.** Rio de Janeiro, 1986.

AHRENDT, A. **MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS – PROPOSTA DE UM SISTEMA DE PREVISÃO: APLICAÇÃO NA ÁREA URBANA DE CAMPOS DO JORDÃO - SP.** Tese (Doutorado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, UFSCar, 2005.

ALBUQUERQUE, L. F. F.; ARIOLI, E. E.; DIAS, A. D. A.; KIRCHENER, C. A. **GEOLOGIA DAS QUADRÍCULAS DE BLUMENAU E JOENVILLE, SC.** Porto Alegre: DNPM/CPRM, 1971. 101p. Relatório interno.

AMARAL JUNIOR, A. F. **MAPEAMENTO GEOTÉCNICO APLICADO A ANÁLISE DE PROCESSOS DE MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS: COSTA VERDE-RJ, ESCALA 1:10.000.** Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ÂNGULO, R. J. **GEOLOGIA DA PLANÍCIE COSTEIRA DO ESTADO DO PARANÁ.** Tese (doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992. 334p.

ANGULO, R. J. **O CENOZÓICO DO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ.** Curitiba: UFPR/Laboratórios de Estudos Costeiros, 2002.

BERVEGLIERI, A.; MENEGUETTE JUNIOR, M. M.; PITERI, M. A. **RECLASSIFICAÇÃO DE VERTENTES EM PERFIL VIA DIAGRAMA DE VORONOI.** In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife – PE, 27-30 de julho de 2010. p. 001-005.

BIGARELLA, J. J.; *et. al.*, **A SERRA DO MAR E A PORÇÃO ORIENTAL DO ESTADO DO PARANÁ.** Curitiba: Secretaria de Estado e Planejamento, 1978.

BORCHARDT, N. **DIAGNÓSTICO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO NA ESTABILIDADE DE VERTENTES DO ALTO E MÉDIO CURSO DA BACIA DO RIO SAGRADO, PR.** Dissertação (mestrado) Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Geologia. Curitiba, 2005.

CAPUTO, Homero P. **MÊCANICA DOS SOLOS E SUAS APLICAÇÕES.** Volume 2, 6ª Edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1987, 498p.

CAPUTO, Homero P. **MÊCANICA DOS SOLOS E SUAS APLICAÇÕES**. Volume 1, 6ª Edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1988, 234p.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; TSUHA, C. H.; GIACHETI, H. **FUNDAÇÕES: ENSAIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CORNFORTH, D. H. **LANDSLIDES IN PRATICE: INVESTIGATION ANALYSIS AND REMEDIAL / PREVENTATIVE OPTIONS IN SOILS**. John Wiley & Sons, Hoboken, Hoboken, New Jersey, USA, 2005. 596p.

CRUZ, L. O. M. **ASSINATURA GEOQUÍMICA DE UNIDADES COLUNIONAIS DA BACIA DO Córrego do Rio Grande – DEPRESSÃO DE Gouveia/MG**. Dissertação (mestrado). Departamento de Geografia, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

DAS, B. M. **FUNDAMENTOS DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA**. São Paulo: Cengage Learning, 2013

DE MARIA, Isabela C. SOLO *In*: RICARDO, Beto. CAMPANILLI, Maura. **ALMANAQUE BRASIL SOCIOAMBIENTAL**, Instituto Sociambiental. São Paulo. 2008. 552p.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS**. 2ª. Ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. 306p.

FERREIRA, Fabiana S. **ANÁLISE DA INGLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO NA DEFLAGRAÇÃO DOS ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS NA SERRA DO MAR (SP)**. Dissertação (mestrado) Programa de pós-graduação em Geografia Física da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

FIORI, A. P. **INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO**. Curitiba, Ed. UFPR, 1997. 249p.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **FUNDAMENTOS DE MECÂNICA DOS SOLOS E DAS ROCHAS, APLICAÇÃO NA ESTABILIDADE DE TALUDES**. 2ª Ed. Rev. e ampl. Curitiba: Ed. UFPR, 2009. 604p.

FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T.; NEUMAN, G.; MOTIN, T. E.; D'ARÓZ, P. **PLANO DE TRABALHO: ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO MAPEAMENTO DE SOLOS E ATIVIDADES DE CAMPO. PROJETO: RISCOS GEOLÓGICOS EM TALUDES RODOVIÁRIOS: DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE MAPEAMENTO E GERENCIAMENTO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES PARA BR-376, TRECHO DA SERRA DO MAR (PR-SC)**. Relatório V de acompanhamento das atividades realizadas no trimestre. Curitiba, abril de 2014.

FUCK, R. A. ; MARINI, O. J. ; TREIN, E. A Formação Guaratubinha. *In*: BIGARELLA, J. J. et. al. **GEOLOGIA DO PRÉ-DEVONIANO E INTRUSIVAS SUBSEQUENTES**

DA PRÇÃO ORIENTAL DO ESTADO DO PARANA. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, n. 23-25, p. 237-255, 1967.

GEOTECHDATA.INFO. **ANGLE OF FRICTION.** Disponível em:
<<http://geotechdata.info/parameter/angle-of-friction.html>>. Acesso em Set. 2013. (a)

GEOTECHDATA.INFO. **COHESION,** Disponível em:
<<http://geotechdata.info/parameter/cohesion>>. Acesso em Set. 2013. (b)

GRIEBELER, N. F.; PRUSKI, F. F.; MEHL, H. U.; DA SILVA, D. D.; DE OLIVEIRA, L. F. C. **EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA ERODIBILIDADE E TENSÃO CRÍTICA DE CISALHAMENTO DO SOLO EM CANAIS DE ESTRADAS.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.2, p.166-170, 2005. Campina Grande, PB, DEAg/UFCG – <http://www.agriambi.com.br>.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C M. **ESTABILIDADE DE TALUDES NATURAIS E DE ESCAVAÇÃO.** São Paulo, Edgard Blucher LTDA, 1983. 196p.

HATANAKA, M.; UCHIDA, A. **SOILS AND FOUNDATIONS.** *Japanese Geotechnical Society.* Vol. 36, n. 4, 1-9, Dez, 1996.

HIGHLAND, Lynn. M.; BOBROWSKY, Peter. **THE LANDSLIDE HANDBOOK – A GUIDE TO UNDERSTAND LANDSLIDES:** Reston, Virginia, 2008. U.S. Geological Survey, Circular 1325, 129p.

IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná. **Cartas Climáticas do Paraná – Classificação Climática – Segundo Köppen.** Disponível em:
<<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=597>>. Acesso em 20 ago 2013.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **CIDADES@ - São Francisco do Sul.** Disponível em:
<<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=421620#>>. Acesso em 13 jun. 2013.

KELLER, Edward. **ENVIRONMENTAL GEOLOGY.** 6th Ed. Ontario, USA, 1992. 521p.

KOZCIAK, S. **ANÁLISE DETERMINÍSTICA DA ESTABILIDADE DE VERTENTES NA BACIA DO RIO MARUMBI – SERRA DO MAR – PARANÁ.** Tese (doutorado) Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Geologia. Curitiba, 2005.

LEMES, M. R. T. **REVISÃO DOS EFEITOS DA VEGETAÇÃO EM TALUDES.** Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2001.

LIAO, S. S. C.; WITHMAN, R. V. **OVERBURDEN CORRECTION FACTOS FOR SPT IN SAND.** *In Journal of Geotechnical Engineering, ASCE,* vol. 112, n. 3, pp 373 – 377.

LOOK, Burt. **Handbook of geotechnical investigation and design tables**. Taylor & Francis Group, London, UK, 2007. 331p.

LOPES, F. C. A. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA ESPESSURA DO SOLO E DO NÍVEL FREÁTICO NA ESTABILIDADE DE ENCOSTA**. Dissertação (mestrado). Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Curitiba, 2013.

MAACK, R. **SOBRE A OCORRÊNCIA DE GRANITOS ALCALINOS NO ESTADO DO PARANÁ E SUA PORÇÃO DENTRO DAS FASES OROGENÉTICAS ALGONQUIANAS**. Boletim UFPR – Geologia, n. 4 p. 1-52, 1961.

MINEROPAR. Relatório do Mapeamento das Cartas de Geologia do Paraná- na área de abrangência do Programa Pró- Atlântica. In: **SEMA. CARTAS GEOLOGIA (Sul)**. Curitiba, 2002 a. 1 CD-ROM.

MINEROPAR – Minerais do Paraná. **ATLAS GEOMORFOLÓGICO DO ESTADO DO PARANÁ** – Escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:50.000 / Minerais do Paraná; Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006. 63 p.

MITCHELL, J. K; SOGA, K. **FUNDAMENTALS OF SOIL BEHAVIOIR**. John Wiley & Sons, Inc. USA, 2005.

MURATORI, A.; TREIN, E.; FÜCK, R. A. Folha geológica de Pedra Branca do Araraquara. **CURITIBA : COMISSÃO DA CARTA GEOLÓGICA DO PARANÁ**, 1969. 1 mapa color., 70 x 50 cm. Escala 1:70.000

ORTIGÃO, J. A. R. **INTRODUÇÃO À MECÂNICA DOS SOLOS DOS ESTADOS CRÍTICOS**. 3ª. Ed. Terratek, 2007.

PINTO, Carlos de S. **RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS**. Editora do Grêmio Politécnico, São Paulo, 1983, 137p.

_____. **PROPRIEDADES DOS SOLOS**. 51 – 118 p. In: Fundações Teoria e Prática. 2ª Ed. São Paulo: Pini, 1998.

_____. **CURSO BÁSICO DE MECÂNICA DOS SOLOS EM 16 AULAS**. Oficina de Textos, São Paulo, 2000, 247p.

SESTINI, M. F. **VARIÁVEIS GEOMORFOLÓGICAS NO ESTUDO DE DESLIZAMENTOS EM CARAGUATATUBA-SP UTILIZANDO IMAGENS TM-LANDSAT E SIG**. Dissertação (mestrado). Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1999. 144f.

SCHNAID, F. **ENSAIOS DE CAMPO E SUAS APLICAÇÕES À ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES**. São Paulo. Oficina de Textos, 2000. 189 p.

SCHNAID, F; ODEBRECHT, E. **ENSAIOS DE CAMPO E SUAS APLICAÇÕES À ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 223p.

SILVEIRA, C. T. **ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO NA PREDIÇÃO DE UNIDADES PRELIMINARES DE MAPEAMENTO DE SOLOS: INTEGRAÇÃO DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS EM SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.** Tese (doutorado). Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Curitiba, 2010. 153f.

SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C.; SANTOS, L.J.C.; SIRTOLI, A. E.; DA SILVA, C. R. **PEDOMETRIA APOIADA EM ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS COM OPERAÇÕES DE TABULAÇÃO CRUZADA POR ÁLGEBRA DE MAPAS.** *In: Revista Brasileira de Geomorfologia.* V. 13, nº 2, (Abr-Jun) p. 125-137, 2012. (a).

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; FERREIRA, A. M.; FELIPE, R. S.; KEPEL FILHO, J. L.; FOLADOR, R. M.; COSTA, L. C. **ANÁLISE DO FATOR DE SEGURANÇA DA ESTABILIDADE DAS VERTENTES NA BACIA DO RIO JACAREÍ, SERRA DO MAR PARANAENSE.** *In: Revista Brasileira de Geomorfologia.* V. 13, nº 3, (Jul-Set) p. 287-297, 2012. (b).

STROUD, M. A. **THE STANDARD PENETRATION TEST- ITS APPLICATION AND INTERPRETATION.** Proc. I.C.E. Conf. on Penetration Testing, Inglaterra, Londres. Thomas Telford, 1989.

TREIN, E.; MURATORI, A.; FUCK, R. A. Folha geológica de Tijucas do Sul. **CURITIBA: COMISSÃO DA CARTA GEOLÓGICA DO PARANÁ,** 1969. 1 mapa color., 70 x 50 cm. Escala 1: 70.000.

TUCCI, C. E. M. **HIDROLOGIA: CIÊNCIA E APLICAÇÃO.** 2ª Ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v.4.

USGS – United States Geological Survey. **LANDSLIDE TYPES AND PROCESSES.** Fact Sheet 2004-3072. July 2004.

VELOSO, A. **IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DAS VERTENTES.** GEOgraphia, vol.4, n.8, 2002.

VIEIRA, B. C. **PREVISÃO DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS NA SERRA DO MAR (SP) A PARTIR DE MODELOS MATEMÁTICOS EM BASES FÍSICAS.** Tese (doutorado) Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Rio de Janeiro, 2007. 193f.